



TITLE:

実働荷重による金属材料の疲れに関する基礎的研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

柴田, 俊忍

CITATION:

柴田, 俊忍. 実働荷重による金属材料の疲れに関する基礎的研究. 京都大学, 1965, 工学博士

ISSUE DATE:

1965-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k482>

RIGHT:

実働荷重による金属材料の
疲れに関する基礎的研究

柴 田 俊 忍

実働荷重による金属材料の
疲れに関する基礎的研究

柴 田 俊 忍

目 次

緒 論	1
第1部 疲れの進行に伴う材料の巨視的変形挙動	6
第1章 疲れの進行に伴うひずみおよび応力振幅の変化	6
1・1 緒言	6
1・2 試験方法	6
1・3 試験結果	8
1・4 考察	13
1・4・1 定応力試験および定ひずみ試験における疲れ強さについて	13
1・4・2 定応力試験および定ひずみ試験におけるひずみおよび応力 振幅の繰返しに伴う変化の挙動	14
1・4・3 ヒステリシスループの面積の繰返しに伴う変化	19
1・5 結 言	21
第2章 疲れバウシンガ効果	23
2・1 緒言	23
2・2 試験方法	23
2・3 試験結果および考察	28
2・3・1 両振りねじり疲れ試験結果	28
2・3・2 最大せん断応力 τ_{\max} がねじり降伏点より10%低い場合	28
2・3・3 τ_{\max} が降伏点の場合	32
2・3・4 τ_{\max} が降伏点より若干高い場合	35
2・3・5 3つの τ_{\max} の場合の結果の比較	39
2・3・6 炭素鋼の結果との比較	41

2・4 結言	45
第3章 二段二重重複繰返し応力による疲れ挙動	46
3・1 緒言	46
3・2 応力繰返しがヒステリシスループおよび材料の機械的性質に及ぼす影響	48
3・2・1 試験方法	48
3・2・2 試験結果および考察	49
(a) 弾性限度	53
(b) 残留ひずみ	57
(c) 硬化係数	59
(d) 疲れ寿命と弾性限度・残留ひずみ・硬化係数およびヒステリシスループが囲む面積との関係	62
3・2・3 結言	64
3・3 疲れ寿命と塑性ひずみおよび弾性履歴エネルギーとの関係	65
3・3・1 試験方法	65
3・3・2 試験結果およびその考察	66
(a) 応力一段の結果および考察	66
(b) 二段二重重複荷重における塑性ひずみおよび弾性履歴エネルギーの変化	68
(c) 二段二重重複荷重における疲れ被害曲線	74
(d) 疲れ寿命と弾性履歴エネルギーとの関係	78
3・3・3 結言	82
3・4 二次応力における塑性ひずみ振幅の変化	82
3・4・1 試験方法	82
3・4・2 試験結果および考察	83
(a) 応力一段のとき	83

	(b) 応力二段のとき	85
	(c) $S-N$, ϵ_p-N および $w-N$ 曲線より求めた累積繰返し数比	
6	の関係	90
6	3・4・3 結言	92
	3・5 平面曲げ疲れ試験における疲れき裂の進行について	92
18	3・5・1 試験方法	92
8	3・5・2 試験結果および考察	95
9	(a) 応力一段のとき	95
3	(b) 応力二段のとき	97
7	3・5・3 結言	103
	3・6 結言	104
2	第2部 実働荷重下の疲れ強さ	106
4	第4章 応力波形の疲れ強さに及ぼす影響	106
5	4・1 緒言	106
7	4・2 試作複調和繰返し応力疲れ試験機	108
	4・2・1 試験機構造概略	108
	4・2・2 荷重発生部および駆動部	110
	4・2・3 平均荷重部	113
	4・2・4 試験片および荷重検出部	114
	4・2・5 応力波形の一例	117
	4・3 試験方法	117
9	4・4 正弦波応力とピーク波応力との比較	122
2	4・5 正弦波応力と双子波応力との比較	127
12	4・6 応力波形の相違による応力振幅の変化の挙動	131
13	4・7 複調和応力波による疲れ強さ	134
3	4・7・1 正弦波形による実験結果	135

4・7・2 複調和応力波による実験結果	135
4・8 結言	138
第5章 多段多重重複回転曲げ疲れ強さ	140
5・1 緒言	140
5・2 試作多段多重重複およびプログラム荷重負荷装置	142
5・2・1 多段多重負荷装置	142
(a) 三段多重重複荷重装置	142
(b) 五段多重重複荷重装置	143
5・2・2 プログラム荷重負荷装置	144
5・3 試験方法	148
5・3・1 切欠き材の二段多重重複繰返し回転曲げ疲れ試験	148
5・3・2 平滑材の三段多重重複繰返し回転曲げ疲れ試験	150
5・3・3 多段多重重複試験におけるたわみ変化の挙動	151
5・4 切欠き材の二段多重重複回転曲げ疲れ強さ	152
5・4・1 応力一段の疲れ試験結果	152
5・4・2 二段多重重複繰返し疲れ試験結果	154
5・4・3 繰返し数比 n_A/n_0 が破断までの繰返し数 N に及ぼす影響	157
5・4・4 応力比 σ_A/σ_a が N に及ぼす影響	159
5・4・5 耐久限度の変化	159
5・4・6 平滑材の実験結果との比較	161
5・4・7 応力修正係数	162
5・5 三段多重重複回転曲げ疲れ強さ	166
5・5・1 応力一段の場合の疲れ試験結果	166
5・5・2 三段多重重複疲れ試験結果	167
(a) σ_1 および σ_2 を固定し σ_3 のみ変えた実験(1)～(8)の結果	167
(b) 応力比一定で応力の大きさを変えた実験(9)および(10)の結果	170

5・5・3	繰返し数比の疲れ寿命に及ぼす影響	171
5・5・4	疲れ寿命の実験値 N と計算値 N_{th} との比較	172
(a)	σ_1, σ_2 一定で σ_3 を変えた実験 (1)～(8)	172
(b)	応力比一定の実験 (9) および (10)	174
5・5・5	応力値に関する考察	174
5・5・6	二段重複および三段重複疲れ試験の比較	178
5・6	多段多重重複回転曲げ疲れ試験中の試験片のたわみ挙動	178
5・6・1	応力一段の結果	178
5・6・2	応力二段の結果	179
5・6・3	応力三段の結果	183
5・6・4	考察	183
5・7	結言	186
第6章	実働荷重による疲れ挙動に関する考察	188
6・1	緒言	188
6・2	実働荷重による疲れ挙動に関する考察	188
第3部	長方形断面のねじり疲れ強さおよび金属結晶の薄箔中に存在する 単一転位周辺の応力分布に関する研究	191
第7章	長方形および円形断面のねじり疲れ強さに関する研究	191
7・1	緒言	191
7・2	試験方法	195
7・3	試験結果	199
7・3・1	静ねじり試験結果の比較	199
7・3・2	疲れ試験結果	200
7・3・3	疲れ試験結果の考察	204
7・4	結言	208

第8章 薄箔 結晶中に存在する単一らせん転位周囲の応力分布	209
8・1 緒言	209
8・2 計算の基礎式の導入	210
8・3 応力分布の計算	216
8・4 結言	223
結 論	224
参考文献	226

緒 論

長年月使用される機械部品や構造物が運転中、あるいは使用中危険な破壊が起らないよう定期的な検査を行ない、疲れき裂の有無を検査することはすでに19世紀の始めから行なわれていた⁽¹⁾。しかしWöhler が車軸のS-N曲線を求める⁽²⁾までは金属の疲れに関する問題は学問的な研究の対象とは成らなかった。

Wöhler 以来無数の研究者や設計に携わる技術者が疲れ強さの設定、疲れ破壊の予知、あるいは疲れ破壊の原因等の究明に当たってきたが、今日疲れに関する問題が完全に解決されているとは決して言えず、疲れに関して種々の新しい角度から研究する必要性がある⁽³⁾。このことは金属に限らず材料の疲れ破壊現象が複雑なものであることを示し、今後共実験的・理論的な研究が必要とされる所以である。

今日の材料の疲れに関する研究の目的は種々の荷重条件、材料条件、機械や構造物の使用条件下における疲れ破壊の一般的な法則性を見出し、疲れ破壊の機構を究明することにある。かつこれらの法則性を設計に適用し、疲れ強さを設定することにある。また研究方法を大別すればS-N曲線を求め、あるいは材料の疲れに伴う材料の諸性質の変化等を測定する巨視的研究方法と、原子・分子の運動論から出発し転位(dislocation)を用いて疲れき裂の発生・進行を論ずる微視的研究方法の二つのゆき方がある。しかし工業材料のほとんどは、化学や電子材料の一部を除いて、多結晶材であり、かつ熱処理・表面処理等の処理が施されているため微視的研究結果がそのまま工業材料の諸種の性質に連なっていると考えるのは早計である。結晶粒のオーダで疲れ挙動を研究し巨視的・微視的研究の橋渡しをすべきだと思われる。たとえば無限結晶の中に存在する転位の運動に関しての報告⁽⁴⁾があるが、實在材料中には無数の転位が存在することが知られており、これらの転位の負荷中の相互運動、また結晶粒界に移動したときの挙動については原子・分子論では現在のところ定量的にも定性的にも十分説明できないように思われる。こゝに結晶粒界のエネルギーの問題、結晶粒内外の強度の問題、介在物の働きに関する問題等が生じてくるのではなかろうか。

さて疲れ破壊の機構に関しては今まで非常に数多くの仮説や法則性が巨視的・微視的立場に限らず提出されているが⁽⁵⁾、そのいずれもがあらゆる荷重条件、材料条件に対して疲れ寿命を計算できる

というものではない。このことは、荷重の繰返し数と材料の疲れ被害度とでもいうべきものの関係が直線的でもなく、また一般的な法則性も今の所見当たらないという複雑な関係であるためである。そのために材料の非破壊検査法を用いて⁽⁶⁾ 疲れ破壊の予知が行なわれつゝある。しかしこの疲れ寿命の予知に関する研究は大変興味あるものではあるが、複雑な形状のもの、機械内部の部品、長年月の内に組織変化を生ずる材料等に適用できるまでには更に長年月を要するであろう。このような事情のため多くの研究者や技術者はより安全でかつより経済的な設計を行なうために、各種の材料に対し、処理、寸法、試験条件、荷重条件、雰囲気等々材料の使用条件に対する疲れ強さを求め、併わせて巨視的な立場から疲れ破壊の機構について研究しているのが現状である。

自然界のあらゆる現象はその根底に法則性をもっている。材料の疲れの現象もまたこの自然の法則に従っている筈である。しかし疲れ破壊を支配する因子は上述の材料条件、試験条件、雰囲気の影響等数多くあり、これらの因子を別々に考慮して疲れ強さを求め、疲れ破壊を決定する法則性を発見すべきであるが今日の研究段階ではそれは未だ部分的に成功しているだけである。何故ならばあらゆる条件を同一にして一つの因子の影響のみを変化させることが実験操作上非常に困難なことで実験結果が大きくばらついているからである。疲れ破壊現象を組織感性性として、一つの統計量（疲れ破壊が一義的に決まらず統計的な分布をするということ）として取り扱おうとする⁽⁷⁾のはこの理由によるものである。

次に荷重条件による疲れ強さの研究概要を展望する。材料の疲れ強さと一般的に言う時は、一定応力振幅の繰返し応力を試験片に与え、所望の繰返し数で破壊するか否かの境界の応力をもって疲れ強さと言っている。しかし実際の機械部品、構造物に加わる繰返し荷重は必ずしも一定応力振幅ではなく、時間と共に振幅の大きさが変化するのが普通である。あるいは又応力波形が正弦波にならず複雑な応力時間関係に従って負荷されている。一定応力振幅の疲れ試験結果より、これら実際の場合の荷重条件下の疲れ寿命を計算するために直線被害法則の概念が産れたが⁽⁸⁾、疲れ被害度が二段二重重複繰返し試験⁽⁹⁾（過大・過少応力の影響を求める試験をも含める）、宥和効果（Coaxing 効果）⁽¹⁰⁾、疲れ試験前の塑性加工による強化⁽¹¹⁾等の実験結果は明らかに疲れ被害が直線的であるという仮説が正しくないことを示している。また疲れ被害の進行が直線的でないということは、疲れの進行に伴うかたさ（硬度）の変化⁽¹²⁾、顕微鏡組織の変化⁽¹³⁾、電気抵抗の変化⁽¹⁴⁾等の測定結果より容易に想像されることである。

しかしこのような事実にも拘らず今日なお多くの研究者は二段二重重複繰返し応力に対して疲れ被害度を求め、疲れ寿命の直線被害法則より計算されるずれを実験的に求めMinerの式との関係について研究を行なっている。しかし残念なことに、これら二段二重重複繰返し試験より求めた疲れ寿命の法則を用いて二段三重、あるいは二段多重、多段多重、あるいは更に一般的なランダム荷重に対する疲れ寿命を予想できるような法則性は今の所未だ発見されていない。しかし運輸産業の高度な発達により使用状態で荷重条件に対する疲れ寿命を求めようとする研究の動きが、この数年の間、疲れに関する研究の重要な課題となっているようである。しかし論ずるまでもなく、実働荷重における疲れ強さ、疲れ寿命を研究する根底には使用材料、使用荷重の下における疲れ強さ、疲れ寿命に関する法則性を求めることの他に、疲れ破壊の機構を実働荷重の下で追求しようとする目的がある。このような目的がなければ、単に設計データを求める技術者に終わってしまうし、疲れ破壊全体を説明し得る法則性を見い出すことは不可能であろう。

このような観点に立ち、本論文では疲れの進行に伴って材料が示す諸機械的性質が如何に変化するか、また繰返し応力の大きさが途中で一度変化する二段二重および何度も変化する二段多重、三段多重重複疲れ試験における疲れ寿命と負荷応力の関係等について研究した結果を論ずる。なおこれらの研究を行なうに当って次の三点に主眼をおいて研究を進めた。すなわち

- (1) 実働荷重下での疲れ強さ、寿命の法則性を見い出す。
- (2) 疲れの進行に伴う種々の挙動の変化を見い出す。
- (3) 上の研究に必要な疲れ試験機および装置の開発。

ただし本論文においてはこれら3点を別個に取り扱うことは避け、3部に分けて、材料の進行に伴う材料の巨視的変形挙動（第1部）実働荷重下の疲れ強さ（第2部）、および実働荷重には直接関係ないが、長方形断面と円形断面のねじり疲れ強さと薄箔結晶粒に存在するらせん転位周辺の応力分布（第3部）について論ずる。

さて第1部には3章が含まれ、第1章においては定応力および定ひずみねじり疲れ試験におけるひずみおよび応力振幅の疲れの進行に伴う変化について述べる。これは応力振幅一段の一定応力あるいは一定ひずみ疲れ試験で、材料の疲れの進行に伴って材料の軟化あるいは硬化と一般によばれている現象を明確にしたものである。第1部第2章においては黄銅のねじり疲れパウシンガ効果について述べる。静的なパウシンガ効果に相当するものが、片振り繰返し荷重の方向を逆にした場合

にも現われるかどうかを実験的に研究したもので片振二段多重重複繰返し応力に対する疲れ変形挙動に相当する。次に第1部第3章においては二段二重重複繰返し応力による疲れ挙動について論ずる。一次応力を与えたことにより二次応力繰返し中のヒステリシスループの変化、塑性ひずみ、弾性履歴エネルギー、あるいは疲れき裂の進行が一定応力振幅疲れ試験の場合のそれらと比較して如何に異なるかについて論じ、二段二重重複疲れ試験の負荷応力と疲れ寿命の関係を如何に考えるべきかについても触れる。しかしすでに述べた如くこの負荷応力と疲れ寿命の関係は二段二重重複繰返し試験の実験結果であり、二段多重やその他ランダム疲れ試験の疲れ寿命を推定し得る程単純な現象ではなく、疲れ破壊現象がきわめて複雑な現象であるかを示す。

第2部の実働荷重下における疲れ強さの部では応力波形の疲れ強さに及ぼす影響（第4章）と多段多重重複回転曲げ疲れ強さ（第5章）について論じ、最後の第6章において実働荷重による疲れ試験の基礎的な研究方法について考察する。機械部品・構造物に実際に作用する荷重条件になるべく近い条件の下における疲れ試験を行なうことが重要視され、そのために繰返し変動応力、多段多重重複繰返し応力等による試験、あるいはプログラムテスト等が行なわれている。しかしその場合、各試験の繰返し応力の波形は最大応力と最小応力の間を正弦的に変化、繰返しと共に振幅値のみが変化する。しかし実際には必ずしも正弦的に変化していない。したがって正弦波とは異なる応力波形が疲れ強さに及ぼす影響を充分明らかにすることは実働荷重による疲れの問題の解明にとって大切なことであると考えられる。第4章においてはこのような意味から応力波形が疲れ強さに及ぼす影響について論じ、また応力波形によって繰返し数の増加に伴う試験片が示す変形挙動についても論ずる。第5章においては二段多重、三段多重重複回転曲げ疲れ試験を実施しこれらの場合の疲れ寿命の示す傾向と、応力繰返しに伴う試験片のたわみ挙動についても述べ、疲れ寿命の計算について論ずる。

次に第3部においては、第1および2部とは異った研究内容について述べる。

すなわち第3部においては長方形断面をもつ試験片のねじり疲れ試験を行ない、円形断面の試験片のねじり疲れ強さとの比較、断面形状が及ぼす疲れき裂の発生および進行について研究を行なった結果（第7章）、および薄い箔中に存在する転位によって生ずる転位周辺の応力分布状態について計算を行なった結果（第8章）について論ずる。円形断面のねじりでは応力分布は、試験片の表面で最大、試験片の中心に向かって一様に減少するが、長方形断面のねじりでは、長方形の長短両辺

の中心で最大の応力を持ち、中心および試験片断面の頂点では応力は零になる分布をしており、長方形断面の方が最大応力になる面積が円形断面よりはるかに小さい。したがってこのような断面形状が疲れの進行に及ぼす影響は大変興味ある事柄である。

また第8章において述べる転位応力の計算は、従来の転位応力は無限物体において仮定され計算されたものであるが、今日X線等によって直接観測される場合、非常に薄い箔を使っている。その場合、無限物体によって計算された応力分布がこのような箔においても完全に適用されるかどうかを検討したものである。

第1部 疲れの進行に伴う材料の巨視的変形挙動

第1章 疲れの進行に伴うひずみおよび応力振幅の変化

1・1 緒 言

従来低応力疲れ試験における変形や、^{(15) (16)} 定ひずみ試験における動relaxationの試験結果⁽¹⁷⁾が報告されているが、いずれも平均荷重あるいは平均ひずみを与えた場合についての実験が多い。低繰返し数で破断する疲れが最近重要視され、定ひずみの繰返しを与えた際の応力の変化などについての実験結果⁽¹⁸⁾も発表されている。また両振りの長時間疲れの場合について、定応力試験におけるひずみの変化や定ひずみ試験における応力の変化に関する実験結果も若干発表されているが、^{(19) (20)}繰返し開始直後から破断直前までのこれらの挙動や定ひずみ・定応力試験両者についての比較についての報告はほとんどない。^{(21) (22)}

本章においては低炭素鋼について降伏点近傍の定繰返し両振りねじり応力、および定繰返し両振りねじりひずみを与えたときのひずみ振幅および応力振幅の変化、およびヒステリシスループの変化を実験的に求め、疲れの進行に伴うこれらの挙動について論ずる。

1・2 試験方法

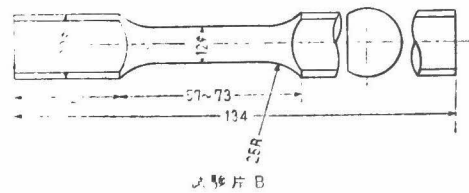
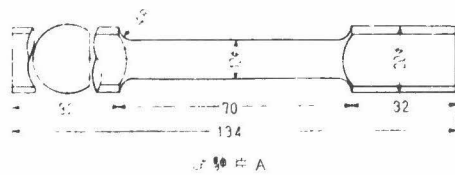
供試材料は0.21% C炭素鋼で28φの圧延棒を875℃1.5時間加熱後炉内冷却して機械加工した。その化学成分を第1表に、機械的性質を第2表に示した。疲れ試験片の形状は第1図に示した通りである。試験片Aは定応力試験に、試験片Bは定応力および定ひずみ試験に用いた。使用した疲れ試験機はUpton-Lewisの繰返しねじり試験機を本研究の目的のために一部改造したものである。試験機の繰返し速度は定応力試験では試験片A（第1図）に対しては384c/min, 試験片Bに対しては100c/min, 定ひずみ試験では、繰返し数150以下のときは20c/min, それ以上の繰返し数のときは100c/minである。試験はすべて両振りねじりで行ない、負荷応

第1表 供試材の化学成分 (%)

C	Mn	Si	S	P
0.21	0.58	0.25	0.042	0.030

第2表 供試材の静的機械的性質

引張機械的性質 (JIS 4号 試験片)						ねじり機械的性質		
σ_{so} (Kg/mm ²)	σ_{su} (Kg/mm ²)	σ_B (Kg/mm ²)	σ_T (Kg/mm ²)	ϕ (%)	ψ (%)	τ_{so} (Kg/mm ²)	τ_{su} (Kg/mm ²)	τ_B (Kg/mm ²)
33	29	51	87	38	54	20.0	19.0	80.0



第1図 試験片形状

力は降伏点の近傍、試験温度は室温である。

応力の測定は試験機の荷重測定ばねの変位をダイヤルゲージで読み、ひずみは試作したヒステロ
(23)
グラフ装置によって測定したヒステリシスループより求めた。なお定応力試験では試験片と駆動部
の間に、試験片のねじりに対するばね定数の約1/3分の1のばね定数をもつコイルばねをそう入す
ることにより、また定ひずみ試験ではこのコイルばねを取り除くことによりそれぞれ定応力および
定ひずみを得るようにした。しかし、繰返し試験中疲れに伴い試験片のねじれ角あるいは応力が若
干変化することによって多少の応力およびひずみ変化が生ずることは免れなかった。ただし定応力
試験における応力振幅の変化はねじり降伏点 1.9 Kg/mm^2 以下の応力では1.5%以下、それ以上の
応力では塑性変形が大になるため応力の変化もそれにつれて多少大きくなる。定ひずみ試験ではひ
ずみ振幅の変化は塑性変形の大なる所でも1.3%以下であって、無視し得る程度であった。

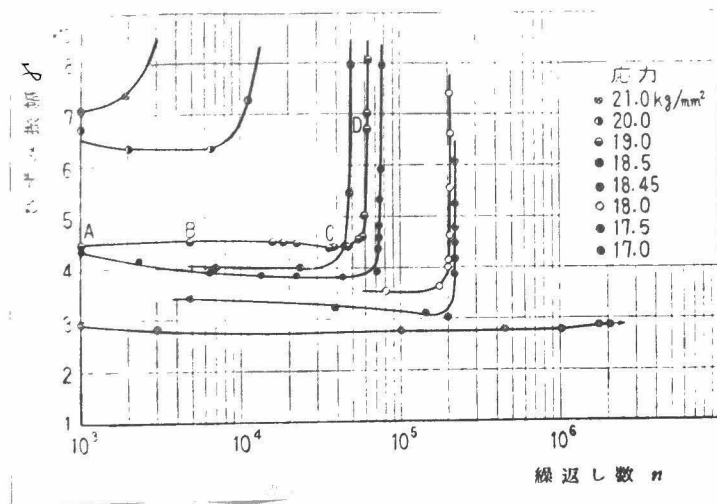
応力の算出はすべて弾性式(1)によって行なった。

$$\tau = \frac{16M}{\pi d^3} \quad (1)$$

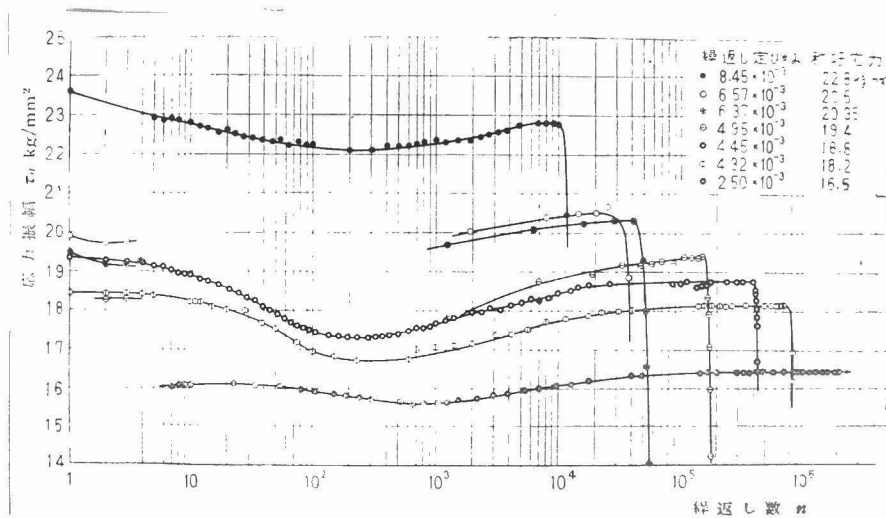
またひずみとしては試験片の肩の部分の断面変化による応力集中を無視して、試験片チャック間の
ねじり角と試験片の試験部分の長さから求めた。

1・3 試験結果

定応力試験における応力繰返し数 n の増加に伴うひずみ振幅 r の変化を第2図に、定ひずみ試験
におけるひずみ繰返し数 n の増加に伴う応力振幅 τ_a の変化を第3図に示した。図に示した如く定
応力試験における r の変化は $n > 10^3$ の範囲において測定したが、定ひずみ試験における τ_a の変
化は $n=1$ から測定した。第3図中に記入された称呼应力とは定ひずみ繰返し試験中疲れ寿命の大
部分を占める応力を指すもので、これは τ_a-n の関係を、横軸を n と破壊までの繰返し数 N との比
に改め等分目盛りで示した第5図より判定した。ただし破壊までの繰返し数 N としては、定応力試
験では試験片が破断分離するときの繰返し数を、定ひずみ試験では破断前応力振幅が減少し、応力
振幅が 1.6 Kg/mm^2 になったときの繰返し数をとった。これは定応力試験では応力振幅が変化し始
める程にき裂が大きくなった後にたゞちに破断するが、定ひずみ試験では応力が減少し容易に破断
しないため便宜上このように定めたものである。なお前に定応力試験で応力 1.9 Kg/mm^2 以下では



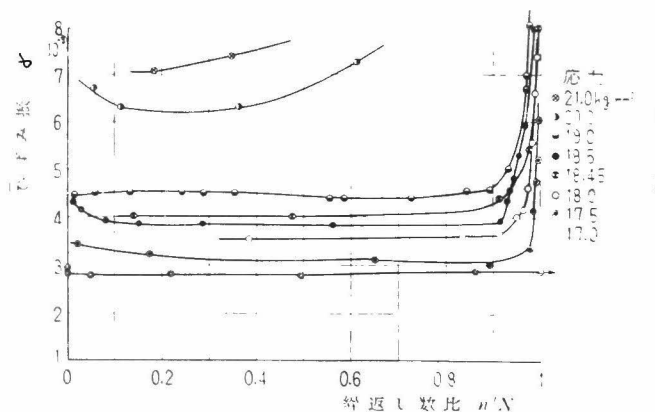
第2図 定応力試験におけるひずみ—繰返し数線図



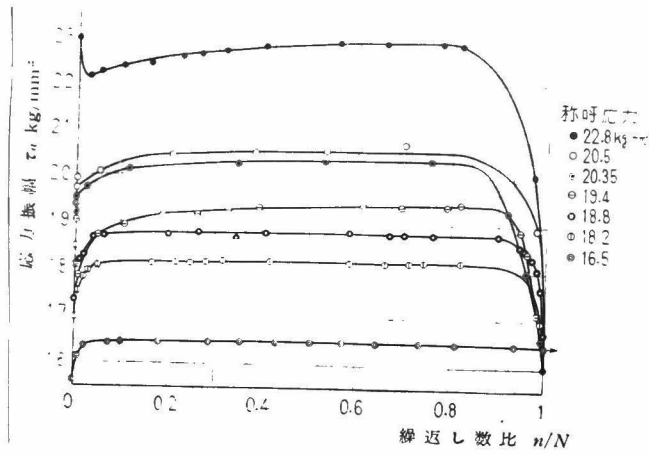
第3図 定ひずみ試験における応力振幅—繰返し数線図

繰返し中応力の変化が1.5%以下と述べたが、割れが発生すればこの限りでなく応力の低下がはなはだしくなった。さて第5図において τ_a は $n/N=0.3\sim 0.8$ の間でほとんど一定であり、これを称応力と呼ぶことは上述した通りである。第4図は第5図と同様、定応力試験におけるひずみ r の変化を横軸に n/N を等分目盛りでとって表わしたものである。第4図および第5図において、破断しなかったものに対する N としては試験を中止したときの繰返し数をとった。

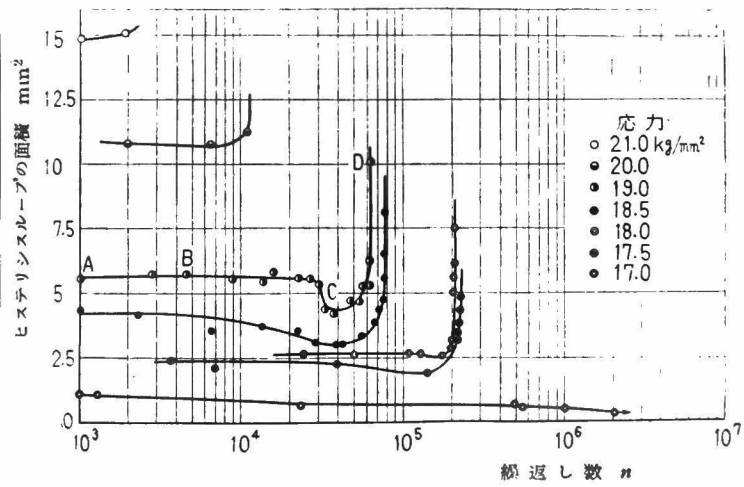
第6図は定応力試験においてヒステリシスループの面積が n の増加に伴って変化する状態を示したものであり、第7図は定ひずみ試験におけるそれである。第6図および第7図におけるヒステリシスループの面積は斜交軸によって得られたモーメント・ねじれ角のループを、直交軸による応力・ひずみの関係に補正したループより求めたものである。



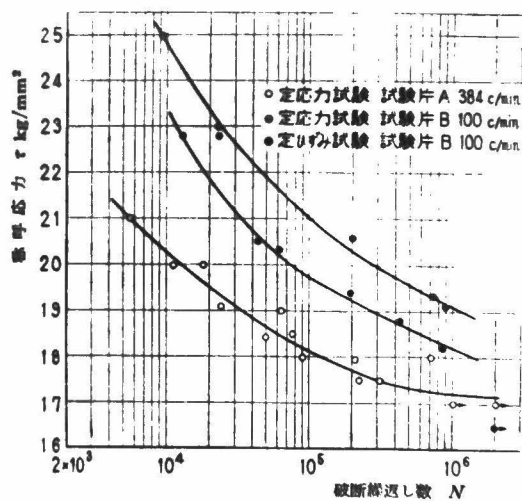
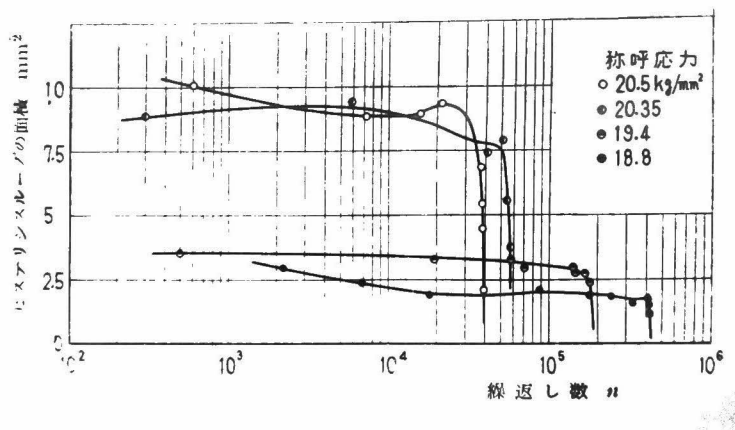
第4図 定応力試験におけるひずみ振幅—繰返し数比線図



第5図 定ひずみ試験における応力振幅—繰返し数比線図



第6図 定応力試験におけるヒステリシス・ループの面積—繰返し数線図



第8図は定応力および定ひずみ疲れ試験結果を応力-繰返し数線図として示したものである。定ひずみ試験に対して、縦軸の応力としては前述の称呼应力を、横軸のNとしては前述の σ_a が 16 Kg/mm^2 に低下したときの繰返し数をとって示してある。また図中白丸、黒丸、 \oplus の試験条件は図に示した通りである。試験繰返し速度 384 c/min では試験機の剛性上の原因により試験片に不測の振動が加っていたが、 100 c/min の試験速度における実験はその振動を除去するために行ったものである。

疲れ試験の実施にあたっては実験の都合上、常に連続運転とは限らずときどき実験を中止した。この休止中に試験片は時効を起して試験再開のとき、定応力試験ではひずみ振幅の低下が、また定ひずみ試験では応力振幅の増加が認められた。しかしこれは休止後に一時的に生ずる過渡的現象であって、試験を続行すると振幅はまもなく休止前のものと連続的につながることが確められたので、こゝでは運転休止後の過渡的現象については除外して考えることにした。

1・4 考 察

以上得られた結果について疲れ強さの比較、ひずみ振幅・応力振幅の疲れの進行に伴う変化の挙動、ヒステリシスループの変化の挙動等について考察することにする。

1・4・1 定応力試験および定ひずみ試験における疲れ強さについて

第8図において2種類の繰返し速度による定応力試験の結果を比較すると、繰返し速度 384 c/min の方が 100 c/min に比べて疲れ強さは $N=10^4$ で 4.5 Kg/mm^2 、 $N=10^5$ で 3 Kg/mm^2 、 $N=10^6$ で 2 Kg/mm^2 ずつ小さくなっている。この原因は前述のように繰返し速度 384 c/min では試験機の剛性の不足が原因して試験片に不測の振動が加わったため、疲れ強さを著しく減少したものと考えられる。河本・近藤・浜田による重畳微小波をもつ繰返し荷重による疲れの実験結果および計算方法による疲れ寿命よりも、本試験における 384 c/min の疲れ寿命は短い。これは振動の振幅測定が充分でなかったためであろう。したがってこゝでは定応力試験と定ひずみ試験の疲れ強さを比較するためには同一試験条件、すなわち試験片Bの 100 c/min の繰返し速度による実験結果のみを考え、 384 c/min の結果は論じないことにする。

第8図において、定応力試験結果が定ひずみ試験結果と比較して $N=10^4$ で 1.5 Kg/mm^2 、 $N=10^6$ で 0.8 Kg/mm^2 ずつ疲れ強さが高くなっている。換言すれば称呼应力 2.3 Kg/mm^2 で

疲れ寿命は2倍、 21 Kg/mm^2 で3倍、 19 Kg/mm^2 で4倍ずつ定応力試験のほうが長くなっている。定応力試験においても、疲れの進行とともに応力振幅が若干変化するが、その値は前述の如く応力の低いときには1.5%以下と小さい。これに反し、定ひずみ試験では第3図に示したように疲れの進行に伴って生ずる応力振幅の変化は10%に達するものもある。このように考えれば第8図の結果は、二段二重重複繰返し試験で一次応力と二次応力の応力比が1に近いときには疲れ寿命が(25)増大する場合があるという結果に似ている。しかしこれまでの二段二重重複試験とは繰返し回数も異なるし、ねじりと回転曲げと、実験方法も異なっているので、一概に上の様な原因だとは言えない。

1・4・2 定応力試験および定ひずみ試験におけるひずみおよび応力振幅

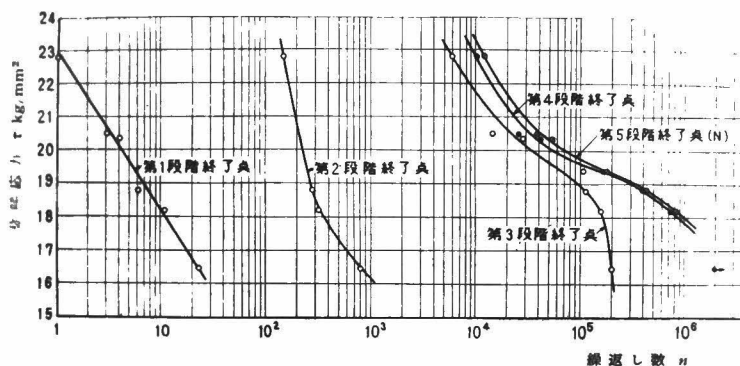
の繰返しに伴う変化の挙動

試験方法の項で述べたように、定応力試験において降伏点以下の応力に対しては繰返しに伴う応力の変化は1.5%以下であったが、降伏点以上の応力では塑性変形が大であるため、繰返しに伴う応力の変化もかなり生じてくる。そのため厳密に定応力試験とは断じ難い。したがって第2図における結果は必ずしも繰返しに伴うひずみの変化の挙動を正確に示していないおそれもある。これに反し定ひずみ試験では繰返しに伴うひずみ振幅自身の変化が1.3%以下であって、ほとんど完全な定ひずみ試験と言ってさしつかえない。それ故第3図および第5図によって定ひずみ試験の際のひずみ繰返しに伴う見かけの応力振幅 τ_a の変化を調べると次の五つの段階に区分される。

- (I) 第1段階 繰返し開始直後の定応力段階
- (II) 第2段階 応力が減少する段階
- (III) 第3段階 応力が増加する段階
- (IV) 第4段階 応力の変化が現われなくなった段階
- (V) 第5段階 応力が減少し破壊に至る段階

本試験材料は焼なましてあるため第3段階において応力が増大する現象を示すが、素材のまま、あるいは焼入れした試験片であれば第3段階で応力振幅が減少することは周知のことである。(22)

これらの段階はもちろん滑らかな曲線で連続しているが、これら各段階を $\tau_a - \log n$ 線図上で直線と見なし、その各直線の交点をもって各段階の終了する繰返し数と判定してそれを図示したのが第9図である。縦軸は称呼応力を、横軸に各終了点の繰返し数をとって示した。この図より各

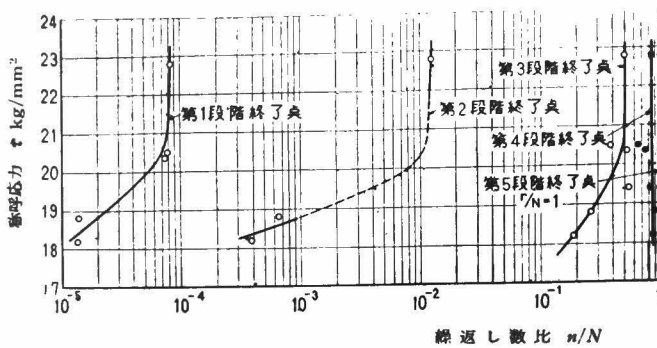


第9図 称呼应力-各段階終了繰返し数線図

(定ひずみ)

段階の終了する繰返し数は称呼应力の増大とともに小さくなっていくが、第3段階の終了点のみは称呼应力がねじり降伏点より若干低い応力以下ときには一定である。すなわち τ_{su} より若干低い 18.0 Kg/mm^2 以下の応力では繰返しによる応力の変動の現われなくなり始める繰返し数は一定であり、本実験の場合それは 2×10^5 である。これらの各終了点の繰返し数と破断までの繰返し数 N との比 n/N を対数目盛で表わしたものを第10図に示した。この図より各段階の終了点の n/N はいずれも称呼应力が約 20.5 Kg/mm^2 までは応力の増加とともに増加するが、それ以上の称呼应力では n/N が一定になっている。また称呼应力の大きさに関係なく第5段階における繰返し数の全繰返し数 N に対する比は $10 \sim 15\%$ では一定である。

次に長寿命疲れ試験における変形挙動について考える。耐久限度に近いと考えられる称呼应力 16.5 Kg/mm^2 の試験では、応力振幅の変化する割合は 5.5% に過ぎないのに反し、大ひずみ振幅の試験では 10% 以上も変化する。また長寿命疲れ試験においても第2段階の終了する繰返し数は 10^5 以下である。^{(19) (20) (21)}長寿命疲れ試験と思われる実験報告において、変形挙動のうち上述の第1および第2段階が報告されていないのは、第5図および第10図より明らかなように、これら2つの段



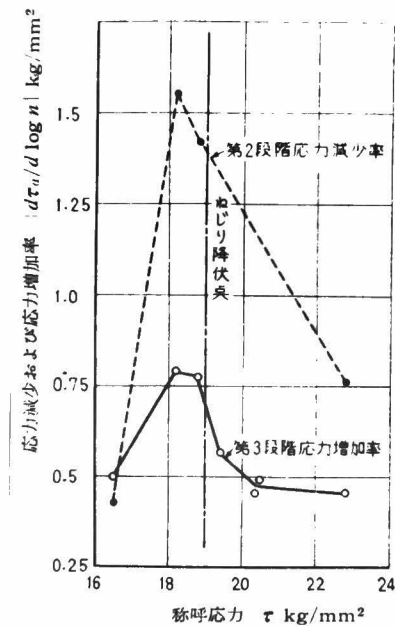
第10図 称呼应力-各段階終了繰返し数比線図

階が全寿命の1%以内に入っているからであろう。

繰返し定ひずみ試験において試験片に加える定ひずみの振幅値が増加すれば第9図から明らかなように、各段階の終了する繰返し数は減少する。本実験においては称呼应力 2.3 kg/mm^2 にて第1段階は消失している。さらに繰返しひずみが増大すれば第1段階および第2段階はともに出現せず、第3段階の途中から現われるということが考えられる。材料は異なるが大ひずみ振幅 ($N \leq 5 \times 10^3$) (18) (22) (26) を与えたときの中空円筒での捩り試験、引張圧縮疲れ試験等でそのような結果が報告されている。

第2段階および第3段階で応力の減少および増大する挙動は第3図に示したように $\tau_a - \log n$ 線図上ではほぼ直線とみなすことができるので、この直線の傾き $ld\tau_a / d\log n$ を求め、これを縦軸に、称呼应力を横軸にとって表わしたものが第11図である。ねじり降伏点より若干低い応力のところで $ld\tau_a / d\log n$ の値は最大になり、その応力より離れるに従い $ld\tau_a / d\log n$ の値は減少する傾向をもっている。以上述べた事柄より、ねじり降伏点が諸種の現象の境界的な役割をもっていることが推定される。

なお第4段階の終了点では目に見えるような割れが発生していた。割れの形状は応力 1.9 kg/mm^2



第11図 第2段階および第3段階における応力減少および

応力増加率 $|d\tau_n/d \log n|$ —称応力線図

以下では試験片の軸方向（圧延方向）に何本も生じ、 19 kg/mm^2 以上の応力では円周割れが2～3本生じ、それらの内の1本が破断面となった。また応力 19 kg/mm^2 付近ではこれら二つの形の
(27)
どちらも現われた。いずれも主せん断応力方向に割れが現われている。

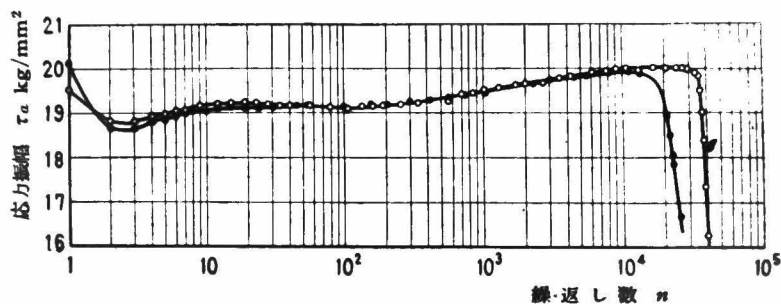
すでに述べたように定応力試験では 10^3 以下の繰返し数におけるひずみ振幅 r の変化を測定しなかった。また厳密に定応力試験とはいえず、繰返しに伴うひずみの変化は定ひずみ試験で示したように明らかではない。しかし定応力試験の場合にも繰返し数の増加に伴う r の変化の挙動は、定ひずみ試験の場合と同様に、次の五つの段階に区分され得る。

(I) 第1段階 繰返し開始直後の定ひずみ段階

- (II) 第2段階 ひずみが増大する段階
- (III) 第3段階 ひずみが減少する段階
- (IV) 第4段階 ひずみの変化が現われなくなる段階
- (V) 第5段階 ひずみが増大し破壊に至る段階

定応力試験の場合にも、定ひずみ試験の場合と同様に、試験片の材料が熱処理を施していない素材のとき、あるいは焼入れを施して硬くなっているときには第3段階でひずみは増大するであろう。第2図に現われているのは第3段階の途中からであるが、この第3段階は定ひずみ試験の場合ほど明瞭でない。このことは応力振幅が小なるところでは r の変化が小さく、また応力振幅が大なるところでは、前述の如く応力自身が変化するため第3段階では応力振幅が増加して、それによる r の増加と第3段階での r の減少とが互いに打ち消し合っているからである。定応力試験でこれらの各段階が存在することは各種の焼なまし炭素鋼のねじり疲れ試験ではっきり示されているが、曲げ⁽¹⁵⁾⁽²⁰⁾試験や引張圧縮試験においても認められており、⁽¹⁹⁾疲れの進行の一つの過程であると思われる。

本実験の供試材料と比較してフェライトが若干多く、引張強さ、降伏点の若干低い材料について両振り定ひずみねじり疲れ試験を行なったときの繰返し数の増加に伴う見掛けの応力振幅 τ_a の変化の一例を第12図に示す。第1段階は消失し、第2段階の終了点における繰返し数は本実験の材料の

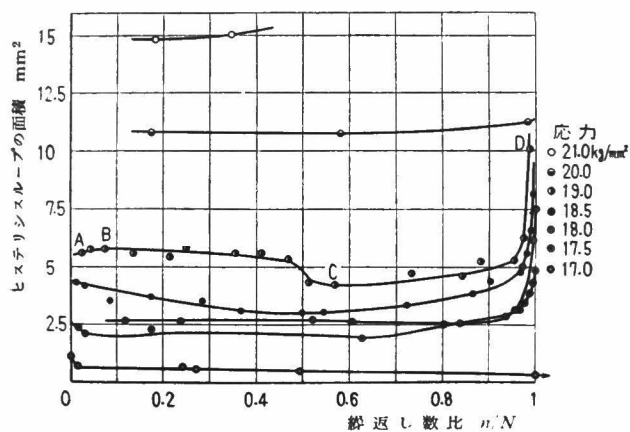


第12図 定ひずみ試験における応力振幅－繰返し数線図

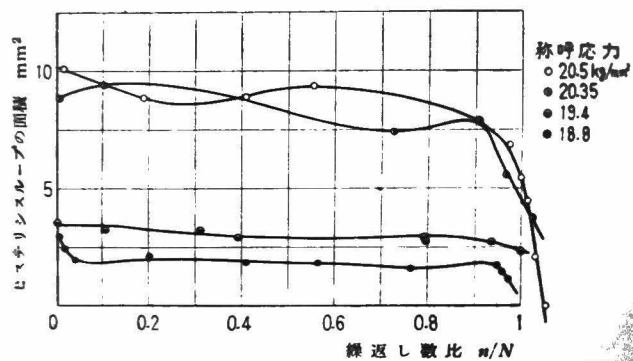
場合に比べて小さくなっている。また第3段階の応力増加率 $1/d\tau_a/d\log n$ の値は第11図のいずれよりも小さい。これらのことはこの材料の実験における称呼应力がこの材料の降伏点よりもかなり大きいことによるものと思われる。さらに第12図において注意すべき点は2本の試験片が示す τ_a の変化の挙動は全く同じであるにも拘らず疲れ寿命においては1.5倍以上の差が生じていることである。このことは疲れ破壊現象がこのような巨視的現象とは別の微視的要因に支配され、また統計的現象であることを暗示するものと考えられる。

1・4・3 ヒステリシスループの面積の繰返しに伴う変化

定応力試験および定ひずみ試験におけるヒステリシスループの面積の変化を示した第6図および第7図において、ヒステリシスループの面積は繰返しの初期においては一定であるが、繰返し数が 10^4 を越えると面積は減少する傾向をもち、破断直前になると定応力試験では面積は急増し、また定ひずみ試験では面積は急減している。ヒステリシスループの面積の変化を破断までの繰返し数比で表わしたものが第13図および第14図である。上述の傾向が明瞭に現われている。定応力試



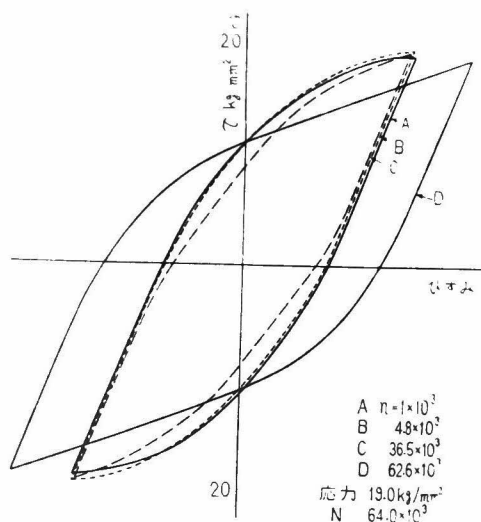
第13図 定応力試験におけるヒステリシス・ループの面積－繰返し数比線図



第14図 定ひずみ試験におけるヒステリシスループの面積－繰返し
数比線図

験で破断するものは n/N が0.6辺りからヒステリシスループの面積が徐々に増加しているが、破断しないものは若干ではあるが減少している。また第4図においてひずみ振幅 γ は若干増加しており面白い対照を示している。これはヒステリシスループの形状自身が繰返しとともに変化していることを示すものである。

測定したヒステリシスループの一例を第15図に示した。これは定応力試験で応力 19.0 kg/mm^2 、破断繰返し数 $N=64.0 \times 10^3$ に対するもので、第2図、第6図および第13図においてそれぞれA、B、CおよびDと記したものは第15図のそれらに対応している。 $n < 3 \times 10^4$ の範囲においては繰返しとともに応力が若干増加してくるため比例領域を越えたところの応力のひずみに対する変化率が大になっているにも拘らずヒステリシスループの面積はほとんど変化しない。しかし n が 3×10^4 を越えたところで、応力およびひずみ振幅にはまったく変化がないにも拘らずヒステリシスループはやせてきて面積が減少している。それ以後においてひずみ振幅は徐々に増加する。破断直前の $n=62.6 \times 10^3$ においてはすでに目に見える割れが発生しており、各繰返し毎の塑性



第15図 定応力試験におけるヒステリシスループの一例

ひずみ量は初期の1.5倍に達し、ヒステリシスループの面積もほぼ1.5倍になっている。

このような目に見える割れの存在によるヒステリシスループの形状の変化は別として、 n が増加するとき応力あるいはひずみの変化が現われない第4段階で、ループの形状が変化し面積が減少する現象は、繰返しによる応力のひずみに対する変化率が增大する現象と、繰返しによって蓄積されたたがり線が飽和し疲れ部分が著しく増大し塑性変形量を大にする現象との釣合が破れ、後者の現象が顕著に現われたものと考えられる。このような現象は繰返しを受けた材料の振動減衰率の測定においても認められている。⁽²¹⁾

1・5 結 言

本章においては焼なました0.2% C炭素鋼を用いて、常温で定応力および定ひずみ両振りねじり

疲れ試験を行ない、両試験の疲れ強さの比較、繰返しに伴う変形を測定し考察を行ない次の結論を得た。

- (1) 試験の途中で運転休止したとき試験片は時効を起して硬化するが、これは過渡的現象で運転を再開するとまもなくこの現象は消失し、運転休止の影響は認められない。
- (2) 定応力試験結果は定ひずみ試験結果に比べ、疲れ寿命が若干長くなった。これは定応力試験において生ずる若干の応力の変化が定ひずみ試験において生ずる応力の変化に比べて小さく、変動応力の際の一次応力と二次応力の応力比の小さいときに疲れ寿命が直線被害法則による値より長くなるという結果によく似ている。
- (3) 小振幅定ひずみ（あるいは定応力）疲れ試験において、繰返し数の増加に伴う見かけの応力（あるいはひずみ）振幅の変化の挙動は五つの段階に区分される。各段階の終了する繰返し数は定ひずみ（あるいは定応力）振幅の増加とともに減少し、破断繰返し数との比で表わすと、称呼应力が 20.5 Kg/mm^2 以上になると各段階の繰返し数比は一定になる。したがって破断繰返し数が 10^3 以下の大振幅繰返し試験では第1および第2段階は消失することになる。またこれらの五段階の存在は、繰返しとともに材料が一様に硬化または軟化するものではないことを示している。
- (4) 応力-ひずみヒステリシスループの面積は繰返し数約 10^4 のところから若干減少することが定応力および定ひずみ両試験で確かめられた。この場合には塑性ひずみなど外面的変形はまったく生じておらず、結晶内部、粒界のエネルギー均衡が破たんしたためと考えられる。
- (5) ねじり降伏点が疲れに伴う諸種の現象の境界的な役割をもっていることが推定される。

第2章 疲れバウシंगा効果

2・1 緒言

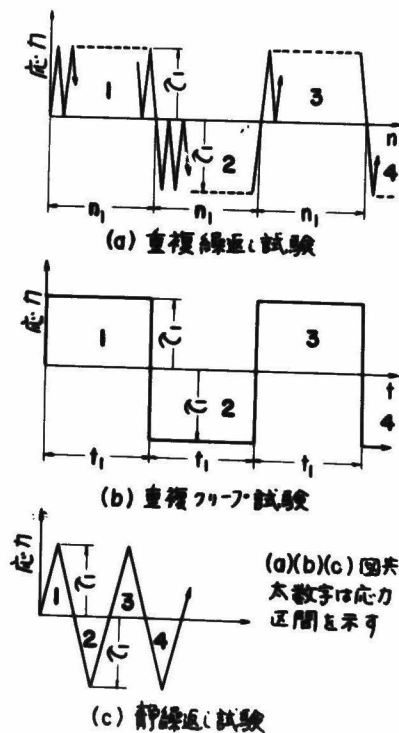
材料に弾性限度以上の応力をかけ、次いで逆方向の応力を加えたとき、最初の変形に比べ、逆方向の応力を加えたときの弾性限度が減少し、塑性ひずみが増大するという現象がいわゆるバウシंगा効果⁽²⁹⁾である。またこのバウシंगा効果が引張圧縮のみならず曲げ、ねじり等の応力においても現われるのは勿論である。この静的バウシंगा効果に対して、片振り繰返し荷重を受けた材料の逆方向の片振り繰返し荷重に対する変形挙動においても、静的バウシंगा効果と同じ変形抵抗挙動を示すかどうかを知ることはバウシंगा効果および疲れ変形の研究を行なう上に大切な事柄である。このような目的によって炭素鋼に関する研究結果が報告されている。⁽³⁰⁾それによると、弾性限度以上の重複片振りねじり繰返し応力を受けた半硬鋼において、降伏点直下の繰返し応力に対して、逆方向の繰返し荷重に対する著しい変形抵抗の減少——すなわち疲れバウシंगा効果——が現われている。しかし降伏点より10%大きい繰返し応力では疲れバウシंगा効果は現われていない。勿論静的バウシंगा効果は現われている。

炭素鋼では降伏点が明瞭に現われるが、降伏点の明瞭に現われない他の材料に対しても上の疲れバウシंगा効果の傾向が現われるものかどうか、また前報⁽³⁰⁾においては応力方向を逆にしたとき生ずるひずみ（静的バウシंगाひずみ）と繰返しに伴って生ずるひずみ（疲れ変形）を合わせて考察しているが、疲れバウシंगा効果という現象がこれら二つのひずみとどのような関係があるのか、等⁽³¹⁾について研究するために、本章においてはひずみ時効の少ないと言われる黄銅を選んで実験を行ない、炭素鋼における研究結果と比較検討する。

2・2 試験方法

材料が両振り繰返し応力を受ける場合は原則として疲れによる変形は起らない。したがって疲れバウシंगा効果は平均応力を伴った繰返し応力の場合に問題となるものである。本研究においては片振りねじり繰返し応力の場合について実験した。すなわち第16図(a)に示すように、最初 τ_1 な

る片振りねじり繰返し応力を n_1 回与える。これを第1応力区間と呼ぶことにする。続いて同じ大きさ τ_1 をもつ方向反対の片振り繰返し応力を n_1 回与える。これを第2応力区間と呼ぶことにする。以下同様のことを繰返し、いわゆる片振りねじり多重重複疲れ試験（以後「重複繰返し試験」と略す）を行なう。重複繰返し試験による変形挙動と比較するため第16図(b)に示すような静荷重を一定時間 t_1 ごとに逆方向に与えた場合の重複クリープ試験を行なった。この場合の負荷時間 t_1 は比較すべき疲れ試験の一応力区間に要する時間と等しくとった。また重複繰返し試験および重複クリープ試験の結果と比較するために次のような試験（第16図(c)）を行なった。すなわち、静的

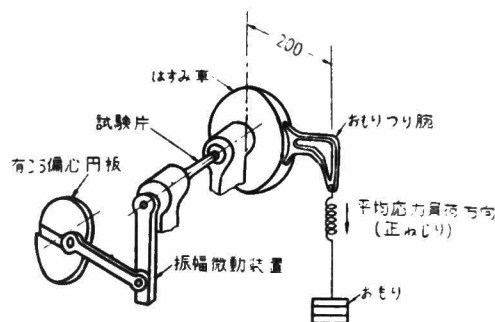


第16図 荷重負荷方法

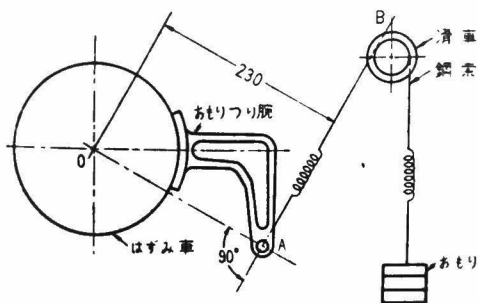
に荷重を加え、最大せん断応力が所定の応力に達したとき荷重を零まで除荷する（第1 応力区間がこれで完了したことになる）。次に逆方向に荷重を加え逆方向の最大せん断応力に達したならば再び零まで除荷する（第2 応力区間完了）。この試験を「静繰返し試験」と呼ぶことにする。静繰返し試験においては、重複繰返し試験における応力繰返しの影響、重複クリープ試験におけるクリープ（時間の経過）の影響がはいってこないことになる。

使用した試験機は西原式高速ねじり疲れ試験機（繰返し速度 1,530 cpm）で、その一部を改造して重複片振り荷重を加え得るようにした。改造した部分は平均応力負荷装置の部分であり、これらを第17図および第18図に示した。第17図は、試験板の本来通り下向きに平均荷重用おもりが作用する場合、第18図はおもりによる力が上向きに作用する場合である。以下第17図の場合を正ねじり、第18図の場合を負ねじりと称することにする。

使用した材料は黄銅でその化学成分を第3表に機械的性質を第4表に示した。熱処理は460℃⁽³⁰⁾ 2時間加熱後炉内冷却した。また緒言に述べたように炭素鋼の結果と随時比較するが、この炭素鋼の化学成分および引張り試験結果をも第3表および第4表に示した。熱処理は行なっていない。か



第17図 試験機略図（正ねじり平均応力の場合）



第18図 負ねじり平均応力負荷装置略図

つ炭素鋼のねじり試験においてねじり降伏点は3本の試験片より 17.5 Kg/mm^2 と判定された。

黄銅の静ねじり試験の応力-ひずみ試験の結果を第19図に示した。

第20図に試験片の形状および寸法を示した。

試験片の変形の測定は、試験片の平行部分の二つの標点に鏡を取りつけ光てこ法によって行なった。なお応力はすべて弾性式から計算したみかけの値である。

黄銅および炭素鋼の試験条件を第5表に示した。

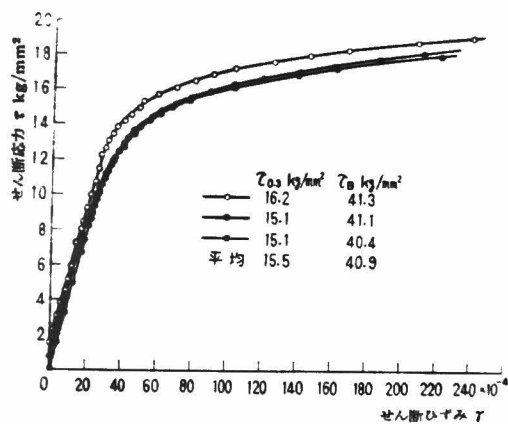
第3表 供試材の化学成分(%)

黄(注)	Cu	Zn	Pb	不純物	
銅	57.0~62	残部	1.0~3.5	$\text{Fe} + \text{Sn} < 1.0$	
炭素鋼	C	Si	Mn	P	S
	0.34	0.24	0.48	0.016	0.028

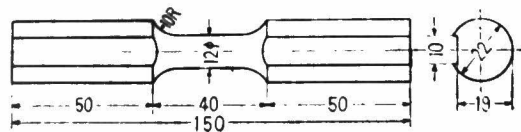
(注) JIS H 3422 によるヒキ物用黄銅棒第1種

第4表 供試材の機械的性質

材 料	引張機械的性質 (JIS 4号試験片)						ねじり機械的性質		
	σ_s (Kg/mm^2)	σ_B (Kg/mm^2)	σ_T (Kg/mm^2)	φ (%)	ψ (%)	E (Kg/mm^2)	τ_s (Kg/mm^2)	τ_B (Kg/mm^2)	G (Kg/mm^2)
黄 銅	23.7	45.6	68.0	28.5	34.0	9300	15.5	40.9	3900
炭素鋼	31.8	55.3	—	22.6	48.5	—	17.5	—	—



第19図 静ねじり試験 $\tau - \gamma$ 線図 (黄銅)



第20図 試験片形状および寸法

第5表 試験条件

	重複繰返し試験	重複クリープ試験	静繰返し試験	τ_1 (Kg/mm ²)
黄銅	$n_1 = 10^6$	$t_1 = 11\text{h}$	実施した	14.0, 15.5, 16.5
炭素鋼	$n_1 = 10^7$ および 2×10^6	$t_1 = 110\text{h}$ および 22h	実施せず	14.0, 17.0, 19.0

2・3 試験結果および考察

黄銅の結果についてまず述べ、次に炭素鋼の結果と比較して疲れバウシソカ効果について考察する。

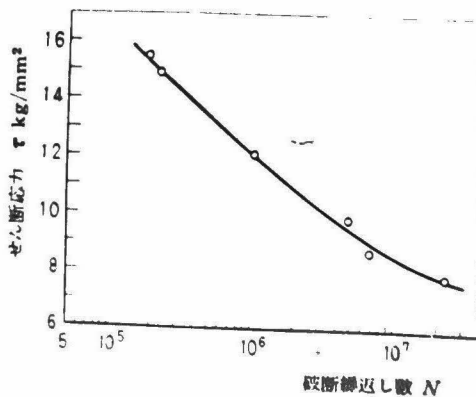
2・3・1 両振りねじり疲れ試験結果

黄銅の両振りねじり疲れ試験の結果を第21図に示した。繰返し数 $N = 10^7$ の時間強度は 8.6 Kg/mm^2 、 10^6 のそれは 12.2 Kg/mm^2 、 10^5 のそれは 16.6 Kg/mm^2 であり、 $N = 2.29 \times 10^7$ においても破断しており、明瞭な耐久限度は現われていない。

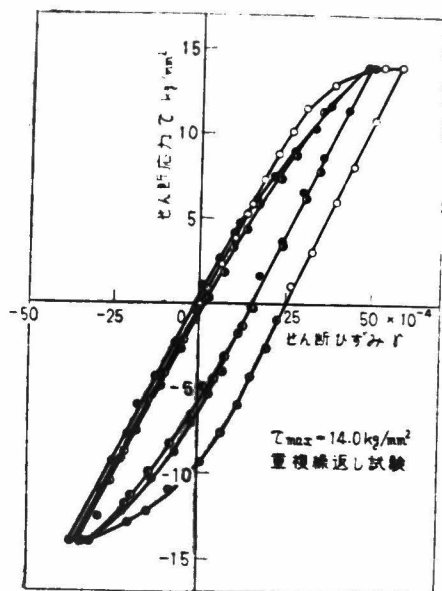
2・3・2 最大せん断応力 τ_{\max} がねじり降伏点より10%低い場合

$$(\tau_{\max} = 14.0 \text{ Kg/mm}^2)$$

重複繰返し試験におけるせん断応力 τ - せん断ひずみ γ 線図を第22図に示した。ただし第22



第21図 両振りねじり S-N 曲線



- 第1応力区間, ⊙ 第2応力区間
 ● 第3応力区間, ⊗ 第4応力区間
 ⊕ 第5応力区間, ⊖ 第6応力区間
 ⊙ 第7応力区間, ⊗ 第8応力区間

第22図 重複繰返し試験の $T-r$ 線図

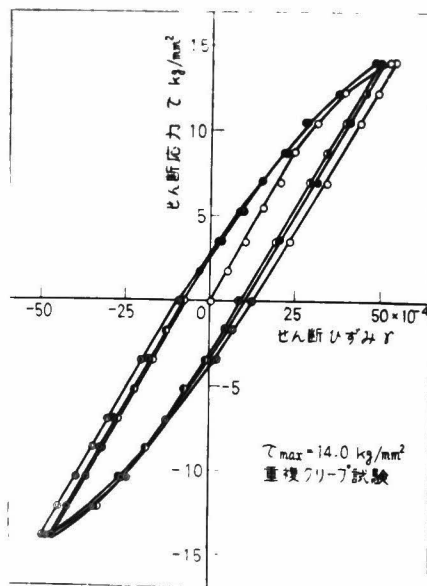
図における各応力-ひずみ曲線は各応力区間における最初および最後の静的負荷および除荷の際に観測した応力とひずみの関係を連ねたものであり、各応力区間を示す記号は図の下に示した記号で表わした。以下の各応力-ひずみ線図においてもこの記号を用いる。また図中最大応力においてひずみ軸に平行なひずみの進行は応力繰返しによって生じた疲れ変形を現わす。疲れ試験の過程における最大せん断ひずみと繰返し数との関係は、炭素鋼の場合と同様な傾向を示す。すなわち、正ひずみ・負ひずみとも各応力区間で繰返し数の増加とともにひずみが徐々に増加するが、ことに各応力区間の初期に著しく現われている。

重複クリープ試験の応力-ひずみ ($T-r$) 線図を第23図に、また静繰返し試験の $T-r$ 線図

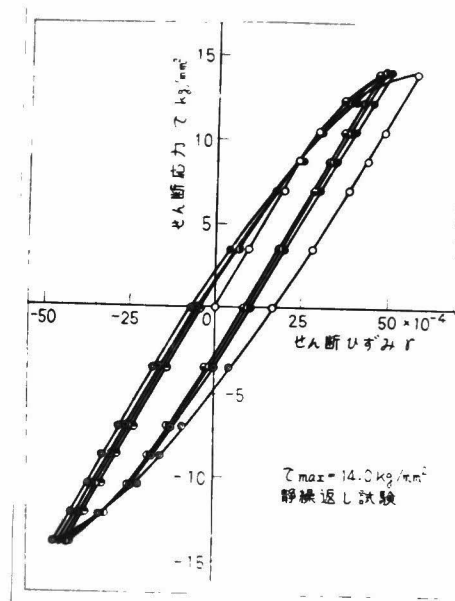
を第24図に示した。

炭素鋼では降伏点以下の片振りねじり応力の場合、 $\tau-\gamma$ 曲線は弾性的に変化していたのに対し、黄銅においては永久ひずみ0.3%の耐力よりも低い応力 ($\tau_1 = 14.0 \text{ kg/mm}^2$) に対しても明らかに $\tau-\gamma$ 曲線は塑性ひずみを生じており、かつ応力区間の増加とともに $\tau-\gamma$ 曲線の形状が変化している。

以上の各試験において各応力区間に生ずる塑性ひずみの量を比較するため、縦軸に塑性ひずみ量を、横軸に各応力区間をとって示したものが第25図である。重複繰返し試験の第1応力区間と第2応力区間における塑性ひずみ量には大差ないが、重複クリープおよび静繰返し試験においてはかなりの塑性ひずみ量の増加がみられる。したがって $\tau_1 = 14.0 \text{ kg/mm}^2$ においては疲れパウシン

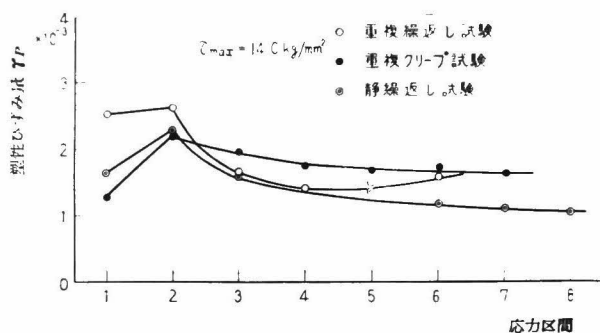


第23図 重複クリープ試験の $\tau-\gamma$ 線図



第24図 静繰返し試験の $\sigma-\epsilon$ 線図

ガ効果は第2応力区間ではあまり著しくないとえよう。第2応力区間以後、応力区間が増すにつれて重複クリープ試験および静繰返し試験においては各応力区間に生ずる塑性ひずみの量は減少する。これはすべり線の増加に伴うひずみ硬化のため変形抵抗が増すためである。これに対して、重複繰返し試験では第3応力区間で塑性ひずみが急減し、第5応力区間以後では塑性ひずみ量が増加する傾向にある。すなわち疲れバウシニング効果によるひずみ量の増加は応力 14.0 Kg/mm^2 の場合には現われないことになる。たゞし相隣る応力区間における塑性ひずみ量で疲れバウシニング効果を比較するならば、第2応力区間で若干の、第5応力区間以後において塑性ひずみ量が増加することが明らかになった。



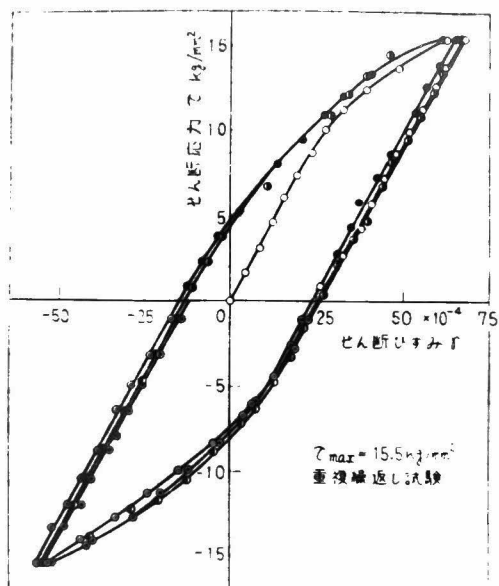
第25図 $\tau_{\max} = 14.0 \text{ Kg/mm}^2$ の各試験の各応力区間における
塑性ひずみ量

2・3・3 τ_{\max} が降伏点の場合 ($\tau_{\max} = 15.5 \text{ Kg/mm}^2$)

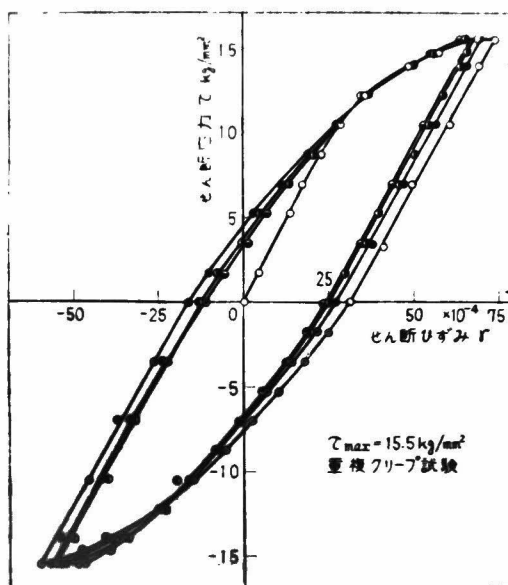
重複繰返し試験における $\tau - \gamma$ 線図を第26図に示した。 $\tau_{\max} = 14.0 \text{ Kg/mm}^2$ の場合と同様に、最大せん断ひずみは繰返し数とともに徐々に増加しているが、負ひずみは正ひずみに比べてその増加量は非常に少ない。また $\tau_{\max} = 14.0 \text{ Kg/mm}^2$ の場合には各応力区間で $\tau - \gamma$ 曲線の形状が変化していたのに比べて $\tau_{\max} = 15.5 \text{ Kg/mm}^2$ の場合には $\tau - \gamma$ 曲線の形状はほとんど変化していない。

重複クリープ試験の $\tau - \gamma$ 線図を第27図に示した。 $\tau_{\max} = 14.0 \text{ Kg/mm}^2$ の場合に比べてかなりクリープ量は大きくなっているが、このクリープひずみは負荷後の数分間において生じており、その後はほとんど変形していない。重複繰返し試験において繰返しとともに徐々に疲れ変形が進行するのとは趣きを異にする。

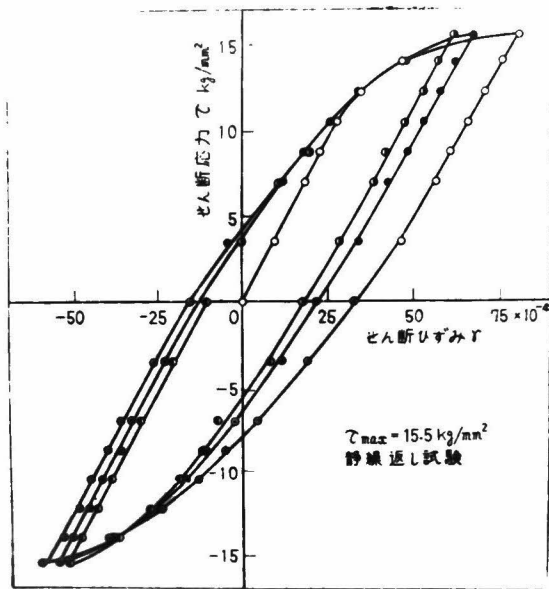
静繰返し試験の $\tau - \gamma$ 線図を第28図に示した。ひずみ硬化によってヒステリシスループが徐々に応力区間の増加とともにやせていくのが明瞭である。



第26図 重複繰返し試験の τ - ϵ 線図



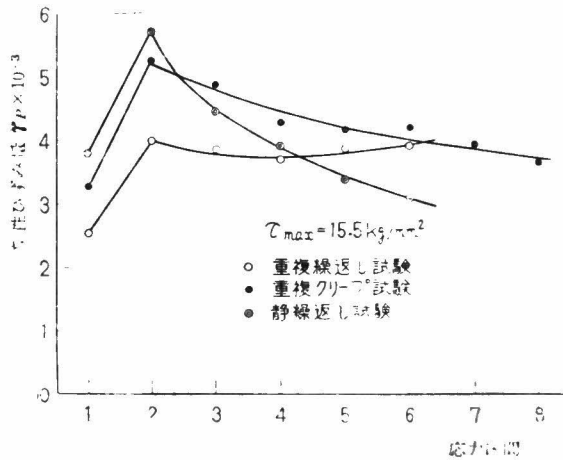
第27図 重複クリープ試験の τ - ϵ 線図



第28図 静繰返し試験の $\tau-\gamma$ 線図

以上の各試験において各応力区に生ずる塑性ひずみの量を図示したものが第29図である。本図に現われたひずみ量の変化の傾向は前述の $\tau_{\max}=14.0 \text{ kg/mm}^2$ の結果とほとんど同じ傾向を示している。しかし重複クリープ試験および静繰返し試験において応力区間の増加に伴うひずみの減少量は $\tau_{\max}=14.0 \text{ kg/mm}^2$ の場合よりわずかに大である。また重複繰返し試験の第3応力区間の塑性ひずみの減少量は少なく、かつ第2応力区間以後の塑性ひずみ量 r_p はいずれも第1応力区間の r_p よりも大であり、第5応力区間以後 r_p が増加の傾向にあることから、 $\tau_{\max}=14.0 \text{ kg/mm}^2$ の場合よりも疲れパウシカ効果が著しいと言える。

$\tau_{\max}=14.0$ および 15.5 kg/mm^2 の場合 (第25図および29図) に、第1応力区間および第2応力区間において、静繰返し試験の塑性ひずみの方が重複クリープ試験の r_p よりも大になっている。もし試験片の材質が全く均一であるとすれば、このことは重複クリープ試験のクリー



第29図 $\tau_{\max}=15.5 \text{ Kg/mm}^2$ の各試験の各応力区間における
塑性ひずみ量

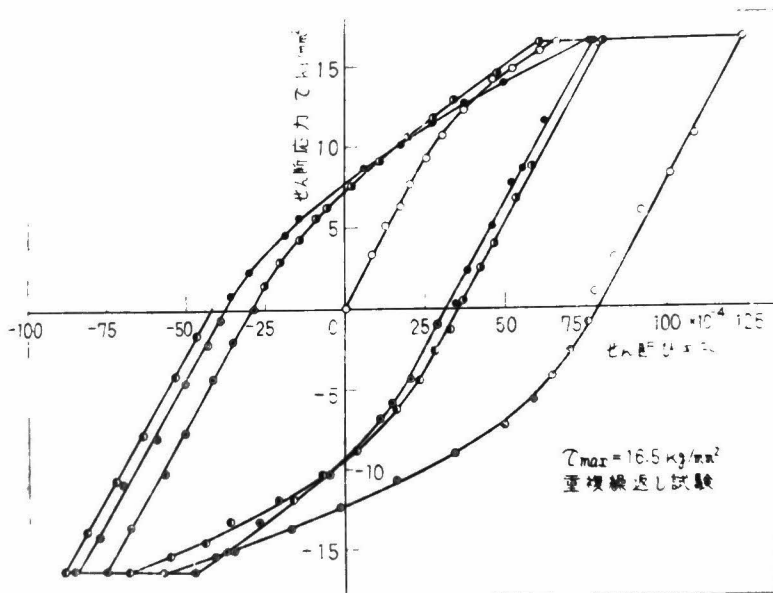
基本
方向
ひずみ
加圧
応力
40%
図解
もが
が

塑性ひずみだけ静繰返し試験の τ_p より大にならねばならず、矛盾することがらである。しかるに静繰返し試験の第1および第2応力区間の $\tau - \epsilon$ 曲線 (第24図および第28図) を見ると、重複クリープ試験の $\tau - \epsilon$ 曲線に比べて降伏点が非常に低いこと、換言すれば同一応力に対する τ_p が静繰返し試験の方が大になっている。これは材料の強度のばらつきによるものであると考えられる。第3応力区間以後においては $\tau_{\max}=14.0 \text{ Kg/mm}^2$ の場合にも 15.5 Kg/mm^2 の場合にも重複クリープ試験のひずみ量の方が静繰返し試験のそれよりも大になり、そのひずみ量の差はクリープ試験において生ずるクリープひずみの量より大きい。

2・3・4 τ_{\max} が降伏点より若干高い場合

$$(\tau_{\max}=16.5 \text{ Kg/mm}^2)$$

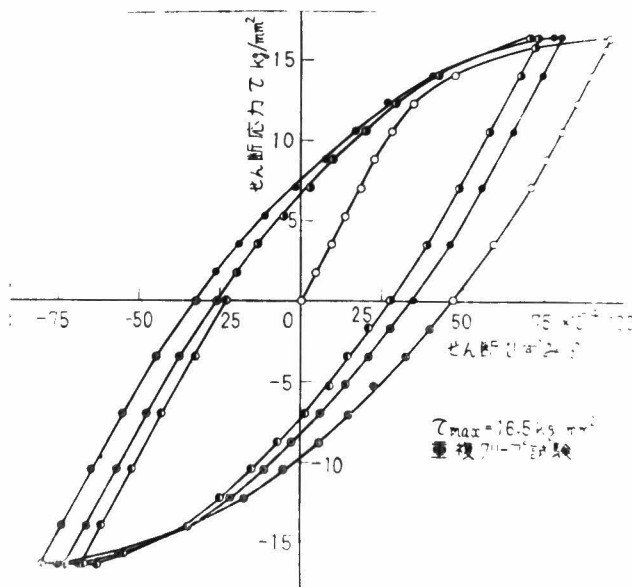
重複繰返し試験における $\tau - \epsilon$ 線図を第30図に示した。前二つの応力の場合と比べて繰返しに



第30図 重複繰返し試験の $\sigma - \epsilon$ 線図

に伴う変化は非常に大きいですが、この応力の場合には、繰返しの初期にそのほとんどが現われた。最大せん断応力を 17 kg/mm^2 まで上げると塑性変形量は 16.5 kg/mm^2 の場合の数倍に達しひずみの測定が不可能になった。また $\tau_{\max} = 17.0 \text{ kg/mm}^2$ のときは応力振幅が 8.5 kg/mm^2 であって第21図に示した $S - N$ 曲線と考えあわせると疲れ寿命が非常に小さくなることが予想される。また前二つの応力においては正ひずみ量に比べ負ひずみの量が少なかったが、 $\tau_{\max} = 16.5 \text{ kg/mm}^2$ では正負ひずみの量が第3応力区間後ほとんど一致している。炭素鋼の場合には降伏点より大なる応力では塑性ひずみ ϵ_p が第1応力区間で多く現われ、それによる硬化のためほとんど負ひずみを生じなかったのに対し、黄銅の場合には明瞭な降伏点がなく第30図の第2応力区間の $\sigma - \epsilon$ 曲線に示されているようにひずみ硬化性が少ないために負ひずみが大きく現われてくるのである。

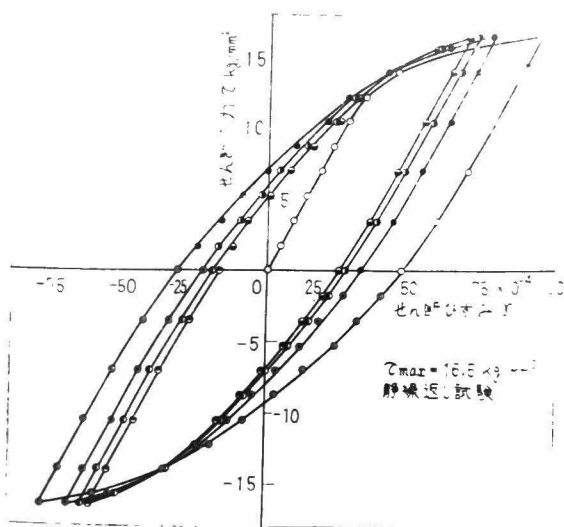
重複クリープ試験における $\sigma - \epsilon$ 線図を第31図に示した。重複繰返し試験の疲れ変形に比べてクリープ量は非常に少ない。



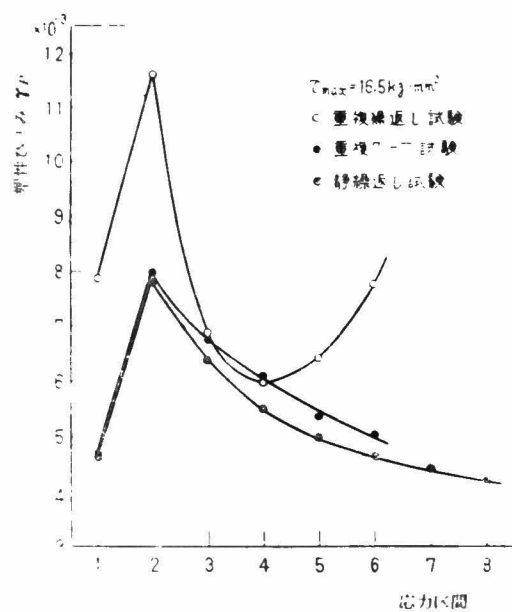
第31図 重複クリープ試験の τ - γ 線図

静繰返し試験における τ - γ 線図を第32図に示した。以上の各試験において各応力区間に生ずる塑性ひずみの量を図示したものが第33図である。ひずみ量の変化の現象は $\tau_{max}=14.0 \text{ kg/mm}^2$ および 15.5 kg/mm^2 の場合と同じ傾向を示しているが、重複繰返し試験の第3応力区間における τ_p は急激に減少し、第5応力区間以後 τ_p は急激に増加する。すなわち第2応力区間および第5応力区間以後疲れパウシंगा効果が顕著である。

硬鋼の場合にはねじり降伏点を越した片振り応力を加えたときには各応力区間ごとに塑性ひずみ τ_p の量は減少して行った。このことは疲れによる硬化が顕著になっているからであり、黄銅の場合にはひずみ時効が少ないため応力の低い場合と同様に疲れパウシंगा効果による塑性変形が多量に現われるものであると考えられる。



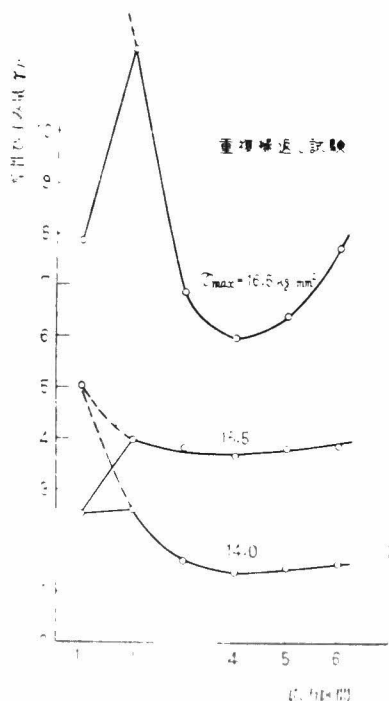
第32図 静繰返し試験の $\tau-\gamma$ 線図



第33図 $\tau_{\max}=16.5 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$ の各試験の各応力区間における塑性ひずみ量

2・3・5 三つの τ_{max} の場合の結果の比較

重複繰返し試験の各応力区間に生ずる塑性ひずみ量 τ_p を、最大せん断応力 τ_{max} をパラメータにして図示したものが第34図である。ただし第1応力区間のひずみ量を2倍にしたものをも図示し、第2応力区間のひずみ量と点線で結んだ。各応力を通して第2応力区間において疲れバウシニング効果が現われており、かつ第5応力区間後一つ前の応力区間の τ_p より増加する傾向が明瞭である。こゝで疲れバウシニング効果が応力繰返しによる硬化の現象より大きく現われてくるものと考えられる。特に $\tau_{max}=16.5 \frac{Kg}{mm^2}$ においてこの現象が著しい。しかし本実験で行なった応力区間の範囲では第2応力区間で生じた τ_p を越えることはなかった。たゞ本実験で行なった以上の応

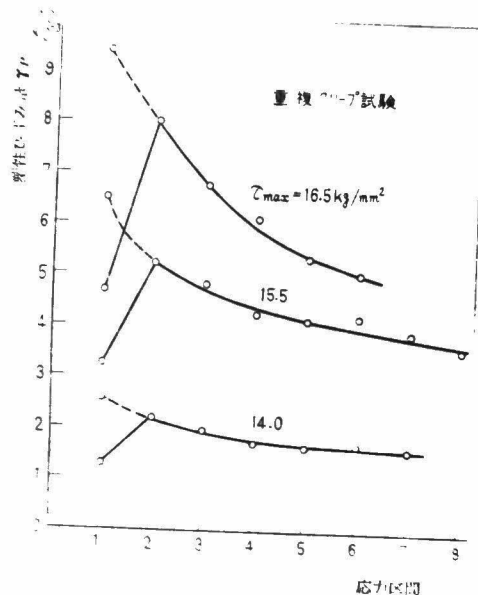


第34図 各応力区間における塑性ひずみ量 (重複繰返し試験)

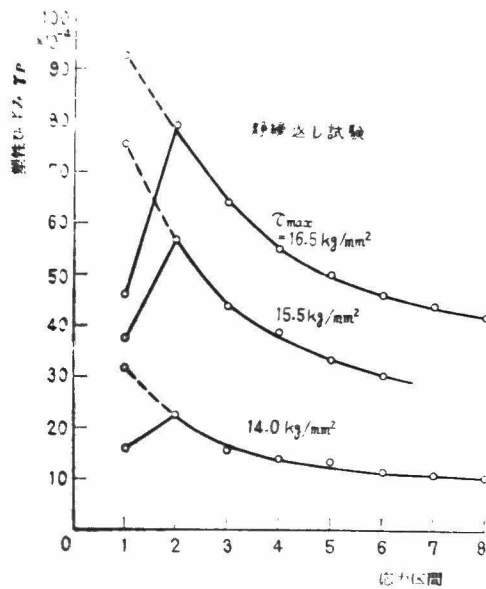
力区間において、第2応力区間において生じた τ_p を越すのではないかと考えられる。

重複クリープ試験および静繰返し試験の各応力区間において生ずる τ_p の値を最大せん断応力をパラメータにして図示したものが第35図、第36図である。両図においても第1応力区間のひずみ量を2倍にしたものを図示し、第2応力区間のひずみ量と点線で結んだ。両試験とも応力区間の進むにつれて τ_p は減少している。しかし静繰返し試験のほうが重複クリープ試験の場合に比べてその減少の割合は大きく非常に面白い結果を示している。この点に関しては次項において考察する。

またクリープ試験は室温で行なっているためクリープ変形はそのほとんどが荷重をかけ終わったときから2～3分以内に生ずる一時変形であって、各応力区間の τ_p に比べれば10%以下である。しかるに応力区間の数が増すにつれて、重複クリープ試験の塑性ひずみ量からクリープによるひず



第35図 各応力区間における塑性ひずみ量 (重複クリープ試験)



第36図 各応力区間における塑性ひずみ量（静繰返し試験）

みを差し引いた r_p の量は静繰返し試験の r_p よりも大になっている。このことはクリープ試験では静荷重が加えられている間に生ずる金属の組織学的な変化のために、逆方向の荷重を加えたときの変形抵抗が減少するのであろうと考えられる。それに対して、静繰返し試験の場合にはひずみ硬化がたゞちに次の応力区間の $\tau-\gamma$ 曲線に影響しているものと考えられる。

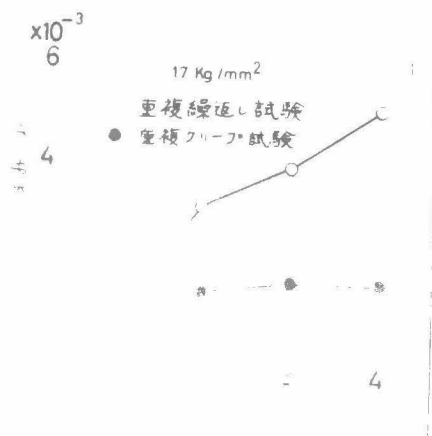
したがって当然のことではあるが、重複クリープ試験と静繰返し試験の $\tau-\gamma$ 線図を同一視することはできない。かつパウセンガ効果あるいは疲れ変形等を研究する際には、本研究に用いた黄銅のごときひずみ時効性の少ない材料においても、試験を連続して行なうかあるいは時間を経て行なうかによって上述のごとき影響の存在することに注意すべきである。

2・3・6 炭素鋼の結果との比較

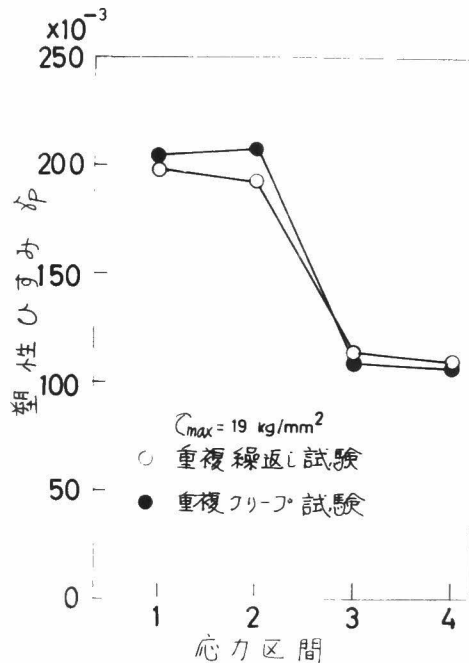
今までにも炭素鋼の結果との比較を所々においてしてきたが、こゝでももう少し詳細に比較することにする。炭素鋼の結果を第37図、第38図に示した。炭素鋼においては降伏点以下の応力 $\tau_1 =$

14.0 Kg/mm^2 に対しては重複繰返しおよび重複クリープ両試験において応力繰返し中塑性ひずみは現われない。第37図は繰返し応力 $\tau_1 = 17 \text{ Kg/mm}^2$ に対するもので $n_1 = 10^7$ である。図より明らかな如く重複繰返し試験では応力区間の増加とともに r_p が増し、疲れパウシंगा効果が明白に現われている。重複クリープ試験では第2応力区間以後 r_p の増加は認められず、重複繰返し試験において明らかに疲れパウシंगा効果の存在を認めざるを得ない。第38図は $\tau_1 = 19 \text{ Kg/mm}^2$, $n_1 = 2 \times 10^6$ に対するものである。各応力区間の r_p は区間数の進むにつれて減少していくことがわかる。このことは前述の如く著しい塑性変形に基く加工硬果によるものである。またこの応力に対しては重複クリープ試験による r_p の変化は重複繰返し試験による r_p とはほぼ同じ大きさであることも興味深い結果である。

炭素鋼の場合には応力区間数が少ないため、黄銅の第5応力区間以上において r_p が増加する現象が炭素鋼の場合にも現われるか否かは疑問であるが、 $\tau_1 = 19 \text{ Kg/mm}^2$ の場合に現われるものと考えてよいようである。



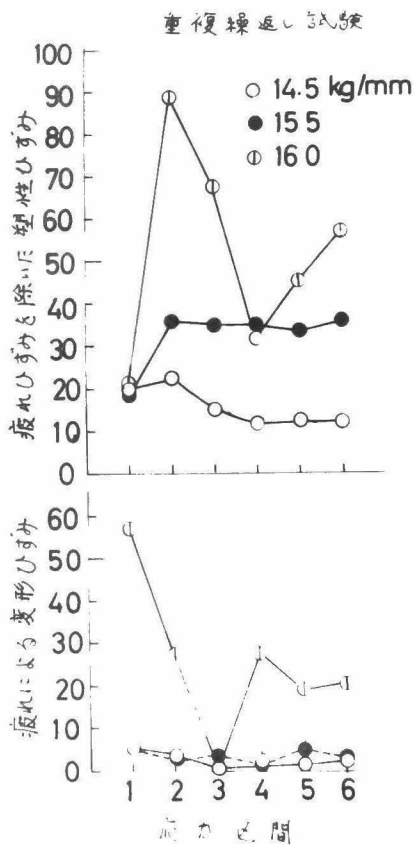
第37図 $\tau_{\max} = 17 \text{ Kg/mm}^2$ の各試験の各応力区間における塑性ひずみ量 (炭素鋼)



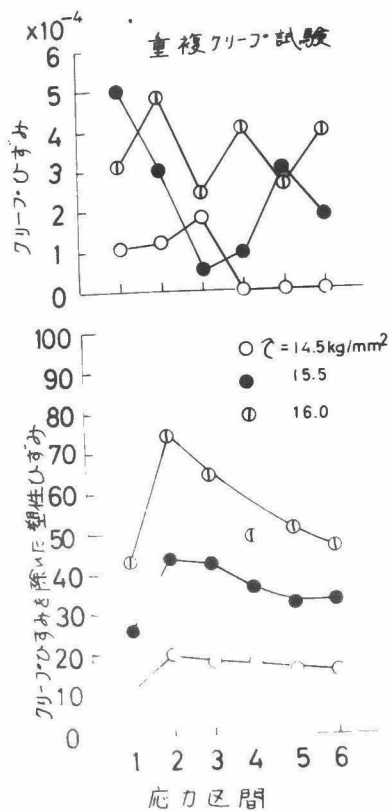
第38図 $\tau_{\max}=19 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$ の各試験の各応力区間における
塑性ひずみ量 (炭素鋼)

全般的に見て重複繰返し、重複クリープ試験とも炭素鋼、黄銅の材料による差は見られないが、炭素鋼の場合には塑性変形による加工硬化が顕著であり、黄銅の場合にはそれが顕著でないというのが大きな差である。

次に第39図および第40図に黄銅の重複繰返しおよび重複クリープ試験の応力切換え時における τ_p および疲れ変形およびクリープ変形による τ_p を静繰返し試験の τ_p と比較して示した。第39図は重複繰返し試験の各応力区間における疲れによる変形ひずみおよびこの疲れひずみを全塑性ひずみから差し引いた残りの塑性ひずみを示したものである。ただし疲れによる変形ひずみとは初期ひずみを考慮していない純粋の繰返し荷重を受けているときの変形である。同様に第40図は重複クリープ試験の各応力区間におけるクリープひずみおよびクリープひずみを差し引いた塑性ひ



第39図 疲れ変形によるひずみ



第40図 各応力区間におけるクリープひずみ

ずみである。こゝにいうクリープひずみも初期ひずみは除いている。疲れ変形ひずみもクリープひずみも応力区間数の増加とともに減少する傾向を示しているといえる。これらのひずみを差し引いた塑性ひずみ r_s と第36図に示した静繰返し試験における r_p との変化は等しくなく、これら3種類の実験結果を直接関連づけることはできない。また第39図および第40図に示したように塑

性ひずみを区分して考察することは必ずしも大切なこととは思われない。

2.4 結 言

新しい概念に基いて提案された「疲れパウシンガ効果」現象について、報告されている炭素鋼の結果と比較するため、降伏点の明りように現れない、かつひずみ時効の少ない黄銅について実験を行なった。その結果、ねじり降伏点（0.3%の永久ひずみを生ずる応力）より低い応力の場合にも、応力区間数が増すにつれて疲れパウシンガ効果が明りように現われ、炭素鋼の場合とは異って降伏点より高い応力において著しいことがわかった。

また同時に行なった重複クリープ試験および静繰返し試験では第2応力区間でパウシンガ効果が現われるが、それ以後の応力区間では変形抵抗が増大し、塑性ひずみ量は順次減少する。しかしその変形抵抗の増加の割合は静繰返し試験の場合が大である。

才3章 二段二重重複繰返し応力による疲れ挙動

3・1 緒言

従来金属の疲れに関する研究において、多数の研究者が疲れ被害に関して研究を行なってきた。たゞしこのいう疲れ被害とは、疲れ被害度の絶対度を測ることは現在の段階では不可能なので、種々の定義の方法が考えられるが次のように表現されるのが普通である。すなわち、ある繰返し荷重を受けた材料が次の応力段階でどれ位の繰返し数に耐え得るか、あるいは前の荷重段階で消費された後の応力段階に対する繰返し数の割合をもって疲れ被害度とよぶ。文字を使って示せば、今 σ_1 なる応力に対して処女材の破壊までの繰返し数を N_1 としよう。ある応力履歴をもつ材料に σ_1 の応力を負荷したときに n_1 なる繰返し数を受けた後に破壊したとすると、この材料が応力 σ_1 を受ける以前の疲れ被害度は

$$D = (1 - n_1 / N_1) \times 100\%$$

であるという。たゞしこの方法は疲れを受けた材料のその後の応力に対する余剰（耐久）繰返し数を表わすものであって、疲れ被害という呼び名は適当でないと思うが、慣用に従って疲れ被害という名称を踏襲することにする。

次に負荷される応力の大きさに従って上に述べた被害度 D の値が変化する。したがって、疲れ被害の絶対値を知することは、不可能に近い。すなわち D の値は過去に受けた応力履歴により絶対的に定まるものではなく、未来に受ける応力履歴によって決定される。⁽³²⁾したがって応力履歴を有する材料についてこれらの種々の機械的・物理的あるいは化学的な検討を行なってそれらの性質を知っても材料の疲れ被害度とは何ら関係がなくなってしまう。それらの性質とその後の応力履歴との関連において始めて疲れ被害に関する考察が可能になる。

さて上述の慣用的な意味での疲れ被害に関する研究の内、応力の大きさを途中一回変更して疲れ試験を行なう二段二重重複疲れ試験に関する研究は数多く発表されており、多少の例外はあるにしてもほとんどの金属材料において初期（一次）応力 σ_1 が二次応力 σ_2 よりも低い場合の疲れ寿命

は直線被害法則から計算される疲れ寿命より大きくなり、 σ_1 が σ_2 より高い場合にはその逆であることが一般的傾向として認められている。(33) (34)

しかしそれらの一般的傾向の中にも例外があり、たとえば最初に残留応力が生ずるような大きな一次応力を与えた後繰返し応力を加えれば残留応力の方向によって寿命が直線被害法則から計算される疲れ寿命より長くなる場合も、また逆に短くなる場合も存在する。このように直線被害法則が一般に成立しないことは明らかである。疲れ被害が直線的でないとするれば材料の疲れ被害度を示す尺度は、疲れ被害の未来効果との関連において、一体如何なるものかが問題になってくる。本章においてはその尺度を定める基礎的な法則性を求めるために行なった金属材料の疲れ試験結果について述べる。

二段二重重複繰返し試験において、一次応力の大きさ、あるいは一次応力の繰返し数によって、二次応力での疲れ強さが大きく影響を受けるのであるから、二次応力を与えたときその材料の示す応力とひずみ（変形）の挙動は一次応力の影響を受けていることは明らかである。したがってこの挙動を研究しこれらの挙動と疲れ寿命の関係を明らかにすることは二段二重重複疲れ試験の結果の解明に興味ある問題であらう。

本章においては、3種類の実験を行ない、観測された資料より二次応力繰返し中に材料が示す種々の性質を研究した。まず始めに黄銅を用いて二段二重重複ねじり疲れ試験を行ない、一次応力 σ_1 から二次応力 σ_2 への応力切換え時、および二次応力を一定繰返し数与えた後に静的に荷重を与えて応力-ひずみの関係（ヒステリシスループ）を測定し、これより読み取った弾性限度、残留ひずみ、硬化係数およびヒステリシスループの面積の変化を求め、二段二重重複疲れ試験の寿命と如何なる関係をもっているかを研究した。

本章で取り扱う次の問題は2種類の炭素鋼を用いて、二段二重重複引張圧縮疲れ試験を行ない、二段二重重複疲れ試験における疲れの進行に伴うひずみ振幅変化の挙動、および弾性履歴エネルギーと疲れ寿命の関係について論ずる。また $S-N$ 曲線、 ϵ_p-N 曲線（ ϵ_p は塑性ひずみ振幅）、 $w-N$ 曲線（ w は弾性履歴エネルギー）より疲れ被害曲線を求めこれらを比較して最後に二段二重重複疲れ試験の結果を w と N の関係で表わす方法を試みる。河本・田中らによると疲れ寿命の50%のところでにおける塑性ひずみ ϵ_p と破断までの繰返し数 N 、および弾性履歴エネルギー w と N の間には

$$\epsilon_p \cdot N^\alpha = C \quad (\alpha, C \dots \dots \text{定数}) \quad (2)$$

$$w \cdot N^\beta = C \quad (\beta, C \dots \dots \text{定数}) \quad (3)$$

なる関係が成立する。 α 、 β 、 C なる定数は材料、実験条件によって異なっているが、これらの関係式はすでに多くの研究者が導いている所である。^{(38)~(46)}

材料が応力の繰返しを受けるときには、塑性ひずみが生じそのため応力繰返しの一サイクルにおいて応力-ひずみのヒステリシスループを描く。そのループで囲まれた面積はエネルギーの次元を有し、一サイクルで材料に与えられた単位体積当りの仕事の量を表わしている。この仕事の大半は迂回による摩擦熱として外部に逃げ、残りは材料内部に蓄積され組織の変化を起しそれが疲れの進行を促すものと考えられる。(3)式における弾性履歴エネルギー w はもち論応力繰返しによって外部から受ける仕事の平均的な意味をもっているに過ぎない。何故ならば疲れの進行に伴って材料が示す挙動は第1章において述べたように複雑であり、一概に繰返しに伴って材料が軟化するとかあるいは硬化するとは言えないからである。しかし疲れ寿命の50%のところにおいては、 $1 \cdot 4 \cdot 2$ においても述べたように、ひずみ振幅は安定しているため、疲れ寿命50%のところにおけるひずみ振幅、弾性履歴エネルギーは全寿命におけるそれらの平均値と考えられるわけである。

また材料の応力履歴の如何に拘らず(2)、(3)式で表わされる関係が成立し、 α 、 β 、 C が材料によって一定に保たれるか否かは疑問である。たとえば二段二重重複疲れ試験において σ_1 が σ_2 より小さいときには一般に破壊までの繰返し数が直線被害法則によって計算される疲れ寿命より大になるという結果を(2)、(3)式の関係で説明できるであろうか。こういった点を解明するために行なった実験結果を3・3、3・4節において取り扱う。

さて本章の最後の節においては、平面曲げ疲れ試験を行ない、二次応力における疲れき裂進行の挙動について述べる。き裂の発生の問題は大変難しく本論文では全く論じないが、こゝで取り扱ったものは切欠材に平面曲げ繰返し応力を与えたもので、目に見えるき裂はかなり早く現われき裂の進行に関して大変興味深い結果がでている。

3・2 応力繰返しがヒステリシスループおよび材料の機械的性質 に及ぼす影響

3・2・1 試験方法

供試材料は黄銅で第2章の第3および4表に示したものと同じである。試験片の形状および寸法は第20図に示したものと同じである。試験機は西原式高速ねじり疲れ試験機である。ヒステリシス

ループを求めるときには疲れ試験機から試験片を取り外し静ねじり試験機を用いて測定した。なおひずみ測定には試験片の2標点に鏡を取り付ける光てこ法によって行なった。

試験は最初応力一段のねじり疲れ試験を行ない、繰返し数 10^7 の時間強度 τ_w 、応力 $0.95\tau_w$ 、 $1.05\tau_w$ 、 $1.15\tau_w$ および $1.25\tau_w$ の疲れ寿命を求めた。これらの応力を一次応力 τ_1 として、これらの疲れ寿命 N_1 の 10 、 30 および 50 （あるいは 65 ）%の繰返し数を一次応力の繰返し数 n_1 とした。 τ_1 の応力を n_1 回与えた後、静的に応力-ひずみのヒステリシスループを測定し、続いて二次応力 τ_2 による応力-ひずみヒステリシスループを測定した。次に τ_2 の応力振幅で $n_2=10^5$ 回の繰返しを与えた後再び τ_2 の応力振幅のヒステリシスループを測定し、以後 τ_2 の応力振幅を与えて破断まで疲れ試験を行なった。 τ_2 としてはねじり降伏点を選んだ。これは一次応力が寿命増大に関与する影響を特に研究するためである。

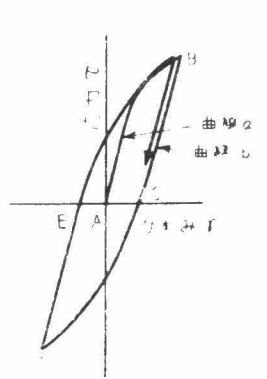
一次応力を二次応力に切換えたときおよび二次応力を 10^5 回繰返した後に測定したヒステリシスループをもとにして、弾性限度、残留ひずみ（ヒステリシスループの幅）、硬化係数（応力-ひずみ曲線を両対数方眼紙上で表わすと、応力-ひずみの関係が比例限度を過ぎてから再び直線となる。この直線の傾きを硬化係数と呼んだ）、およびヒステリシスループが囲む面積を一次応力の大きさおよび一次応力の繰返し数比によって比較した。

なお応力-ひずみ曲線を両対数で表わす際には、第41図に示した点A、B、D、……を曲線a、b、c、…の原点に選んだ。弾性部分の硬化係数（ m と表わす）は一般に1であるが、曲線bにおいては1より小さな値になることがある。また弾性部分を過ぎた2番目の直線の傾き（硬化係数 m' と表わす）は1より小さくなる。 m の値が曲線bで1より小さくなることは応力とひずみの間に直線関係が存在しないことを示す。

3・2・2 試験結果および考察

応力一段の両振りねじり疲れ試験の結果はすでに第21図に示した。黄銅においては $N=10^7$ を越えてもなお明瞭な疲れ限度は現われてこないが、便宜上 $N=10^7$ における時間強度をもって疲れ限度 τ_w とした。第6表は第21図から求めた一次応力および二次応力での破断までの繰返し数 N_1 および N_2 を示す。

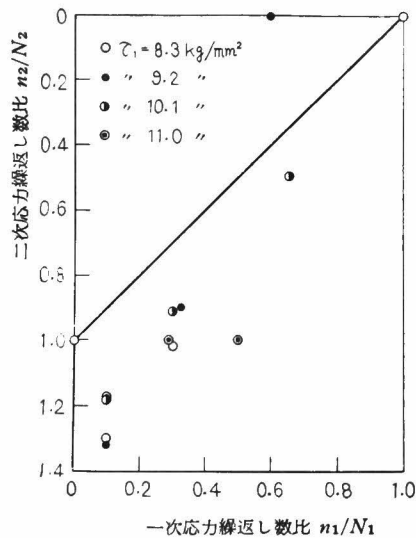
次に二段二重重複疲れ試験の結果を第42図に示した。横軸に一次応力の繰返し数比 n_1/N_1 、縦軸に二次応力の繰返し数比 n_2/N_2 をとり、一次応力の大きさをパラメータにとってある。た



第41図 応力-ひずみ説明図 (応力-ひずみの関係を両対数
方眼紙上で表わす場合、曲線 a, b, に対して点A,
B, ……を原点にとって表わす。)

第6表 試験条件

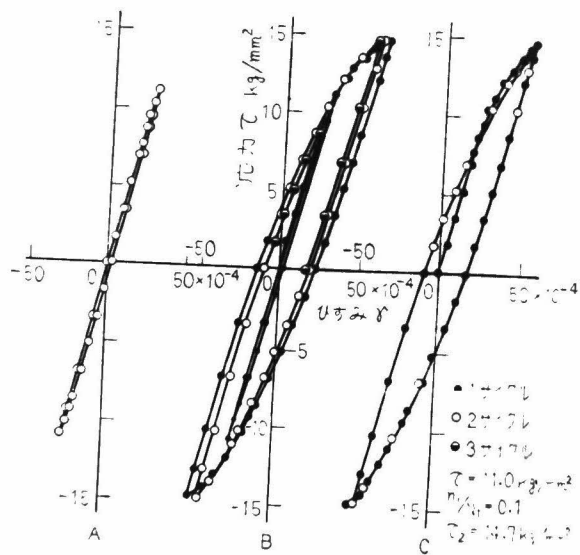
一次応力又は二次応力		応 力 (Kg/mm ²)	破断までの繰 返し数 N
一 次 応 力	0.95 τ_w	8.3	15,020,000
	τ_w	8.8	10,000,000
	1.05 τ_w	9.2	7,100,000
	1.15 τ_w	10.1	3,650,000
	1.25 τ_w	11.0	2,030,000
二 次 応 力 $\tau_{0.3}$		14.7	269,000



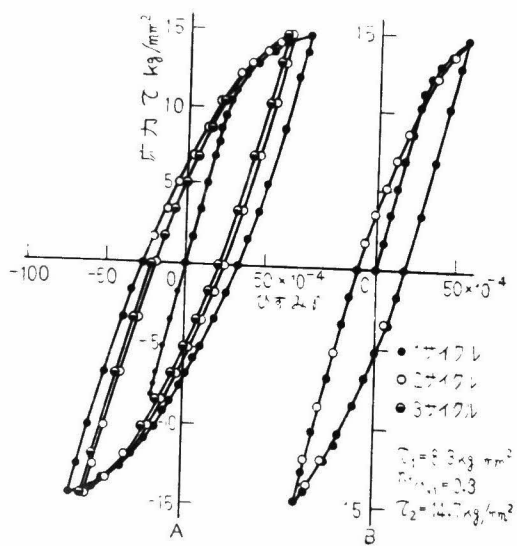
第42図 寿命比曲線

だし二次応力の大きさは試験方法のところで述べたとおり降伏点 14.7 Kg/mm^2 である。一次応力繰返し数比が $n_1/N_1 = 0.1$ においては、いずれの応力に対しても、二次応力の繰返し数比は直線被害法則から計算される値よりほぼ30～40%増加しており、一次応力の大きさにはあまり関係がないようである。しかしいずれにしても、直線被害法則から計算される値より n_2/N_2 の値が増加していることは明らかである。

測定した応力-ひずみヒステリシスループの例を第43図および第44図に示した。第43図は $\tau_1 = 11.0 \text{ Kg/mm}^2$, $n_1/N_1 = 0.1$ また第44図は $\tau_1 = 8.3 \text{ Kg/mm}^2$, $n_1/N_1 = 0.3$ の結果である。第43図のAは処女材に応力振幅 $\tau_1 = 11.0 \text{ Kg/mm}^2$ を与えて測定したヒステリシスループ、同図Bは一次応力 τ_1 を $n_1/N_1 = 0.1$ 与えた後、応力振幅 τ_1 で1回、続いて応力振幅 τ_2 で3回測定したヒステリシスループ、および同図Cはその後応力振幅 τ_2 で $n_2 = 10^5$ の繰返しを与えた後測定した2回のヒステリシスループを示している。第44図AおよびBはそれぞれ



第43図 応力-ひずみ曲線



第44図 応力-ひずみ曲線

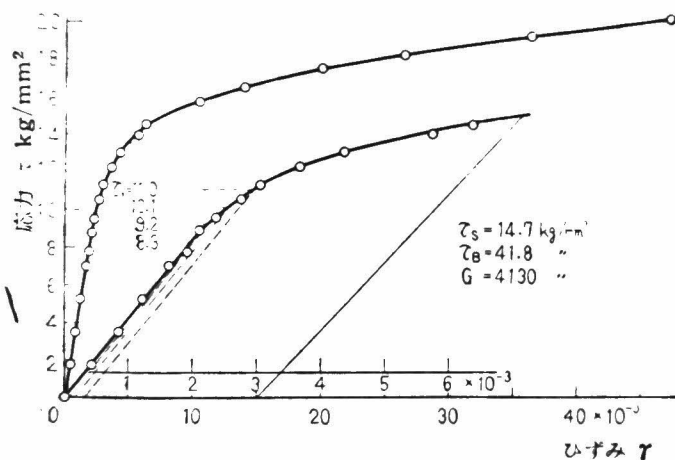
第43図BおよびCのヒステリシスループと同一条件で測定したヒステリシスループを示す。処女材に 8.3 kg/mm^2 の応力振幅を与えてもループを描かないので、処女材の第43図Aに相当するヒステリシスループは省略した。第45図に静ねじり試験の応力-ひずみ曲線を示したが、応力 11.0 kg/mm^2 において塑性ひずみは0.03%しか生じていない。本研究のひずみ測定に用いた装置では一次応力 $\tau_1 = 8.3$ および 9.2 kg/mm^2 に対しては一次応力によるヒステリシスループは全く観測できなかった。しかし $\tau_1 = 11.0 \text{ kg/mm}^2$ の場合でも第41図において点Bから除荷する際、Cに到る前に曲線bはその直線性を失ってしまうので、残留ひずみの量は第45図から得られる値より一般に小さくなる。

これらの応力-ひずみヒステリシスループをもとにして、弾性限度、残留ひずみ、硬化係数およびヒステリシスループが囲む面積を求めて考察することにする。

(a) 弾性限度

(47) ~ (50)

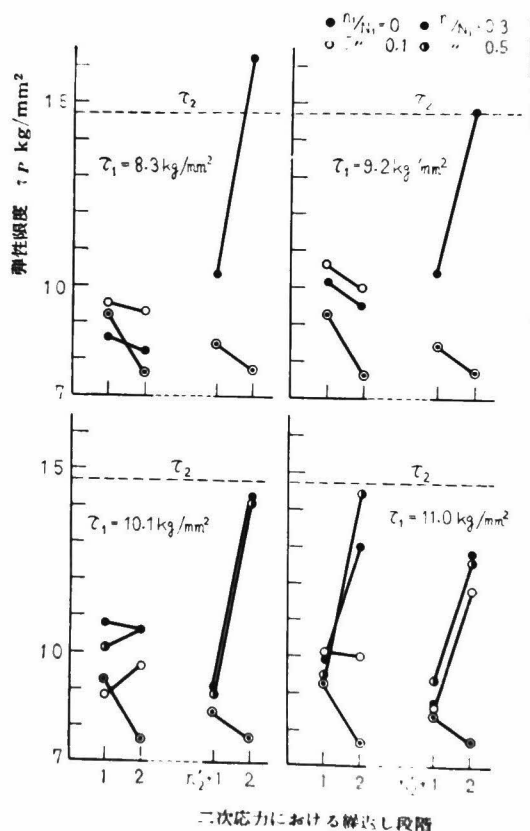
応力一段の疲れ試験において、疲れに伴う材料の諸性質の変化の挙動について研究された報告は



第45図 応力 τ -ひずみ γ 曲線

多くあるが、二段二重重複試験の結果を説明するには不充分である。

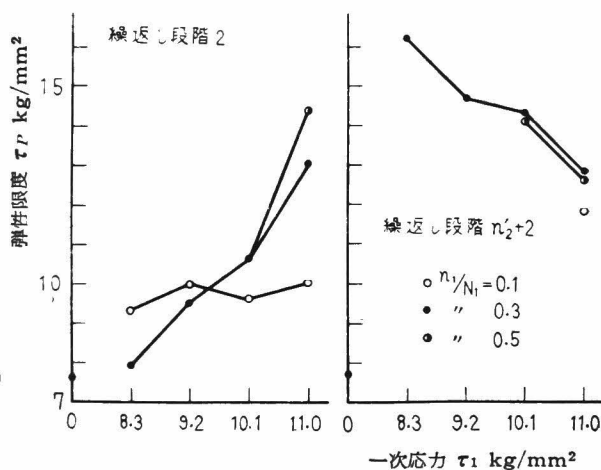
本研究で測定したヒステリシスループより得られた弾性限度を第46図に示した。第46図において縦軸は弾性限度 τ_p 、横軸は二次応力における繰返し段階を表わし、一次応力の繰返し数比をパラメータにとった。ただし繰返し段階1とは一次応力から二次応力に切換えたときの二次応力における最初のヒステリシスループにおいて第41図に示したA Bの部分、繰返し段階2とは同じく第41図のB C Dの部分、繰返し段階 $n_2'+1$ とは二次応力で $n_2=10^5$ 回繰返した後の最初のヒス



第46図 各繰返し段階における弾性限度

テリシスループのABの部分，および繰返し段階 $n_2'+2$ とは同じヒステリシスループのBCDの部分の各応力-ひずみ曲線を指す。ただし繰返し段階2および $n_2'+2$ における弾性限度は第41図の点Bを原点として測定されたものである。第46図中(○)印の点は比較のためにあわせ示した $\tau_1=0$ ， $\tau_2=14.7 \text{ Kg/mm}^2$ ，すなわち応力一段の結果である。

ただこゝで繰返し段階1と2および $n_2'+1$ と $n_2'+2$ とはその有する意味が異なっている。繰返し段階2および $n_2'+2$ はそれぞれ繰返し段階1および $n_2'+1$ より続いたものである。ところが繰返し段階1は一次応力繰返し後の応力0から始まる応力-ひずみ曲線であり，繰返し段階 $n_2'+1$ は二次応力を 10^5 回繰返した後，試験機を止めるために応力振幅が τ_2 から0まで次第に減少したものに，再び負荷したときの応力0から始まる応力-ひずみ曲線をさしている。したがって τ_2 を 10^5 回与えた後のヒステリシスループにおいてCDの部分（第41図）には弾性部分が存在しない筈であるが，繰返し段階 $n_2'+1$ のこの部分には現われてくる。この点を考慮して繰返し段階2および $n_2'+2$ （ヒステリシスループのBCDの部分）の弾性限度のみを，第47図に示す。横



第47図 二次応力における弾性限度

軸は一次応力の大きさを示す。

第46図において $\tau_1 = n_1 = 0$ の場合および一次応力の小さい場合に繰返し段階2および $n_2' + 2$ における弾性限度が、繰返し段階1および $n_2' + 1$ のそれに比して低くなっているのが大きな特徴であるが、これは最大応力に達した後除荷する際に生ずるひずみ回復の現象であると考えられる。なお繰返し段階1および $n_2' + 1$ における弾性限度が一次応力の大小に関係なくほぼ一定の値になっていることは、繰返し段階1では一次応力によってヒステリシスループが描かれることによってABの部分の弾性限度が低くなってくること($\tau_1 = 8.3$ および 9.2 Kg/mm^2 のときにはヒステリシスループを描かないが一次応力の繰返しによって加工硬化していることが第46図よりわかる)、繰返し段階 $n_2' + 1$ では前述のごとく、応力振幅を τ_2 より0まで減少したものに再び τ_2 の応力を与えたこと等によるものであろう。また第46図において繰返し段階 $n_2' + 1$ の弾性限度は繰返し段階2の弾性限度と比較して一次応力の低いものは大であり、一次応力が高くなるほど小さくなっている。

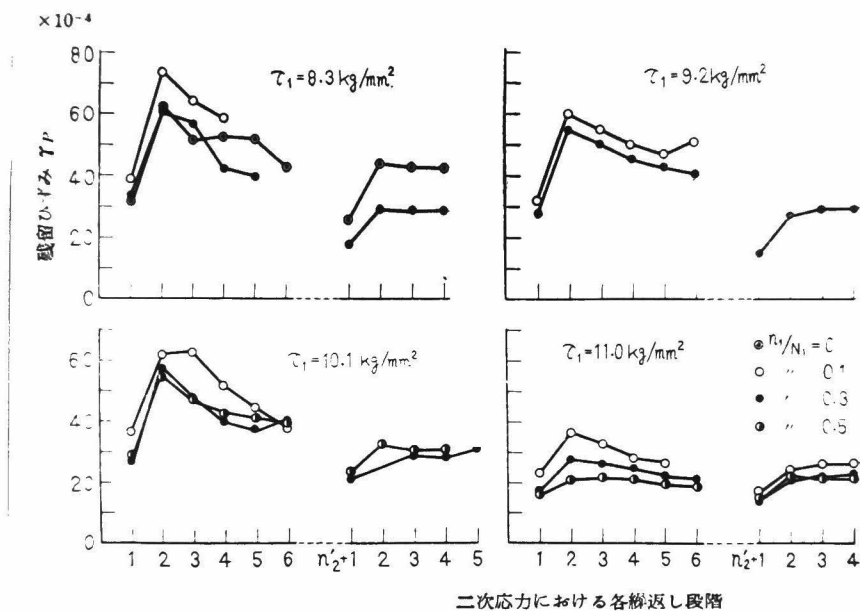
第47図より明瞭であるように、繰返し段階2では一次応力が大きくなるにつれて弾性限度も大になる。たゞしその割合は一次応力の繰返し数比の大なるほうが著しい。繰返し段階 $n_2' + 2$ では逆に一次応力が大きくなるにつれて弾性限度は小さくなる傾向を有し、一次応力の繰返し数比にはあまり関係がないようである。二次応力においてヒステリシスループのBCの部分(第41図)が完全に弾性的であったのは第46図に示すように繰返し段階 $n_2' + 2$ において2例(第46図の破線を越している2点)しかない。 $\tau_1 = n_1 = 0$ の場合の弾性限度は他のいずれの場合の弾性限度よりも小さくなっており、明らかに、一次応力の繰返しを与えることによって材料が硬化しているものと思われる。かつその硬化の割合は一次応力の大きい場合および一次応力繰返し数比の大きい場合に著しい。しかし二次応力 τ_2 を一定繰返し数 $n_2 = 10^5$ 回与えた後では、一次応力の繰返し数比による影響は現われず、逆に二次応力に切換えたときの弾性限度の一次応力の大きさによる傾向とは反対の傾向をもつようになる。

この結果は一次応力から二次応力に切換えたとき、二次応力の繰返しの初期においては一次応力の繰返しによって生ずる硬化の影響を受けて一次応力が高いほど弾性限度も高くなるが、二次応力をさらに繰返している内に一次応力の高い方が軟化現象がより早く進行するのではないかと考えられる。しかしこの仮定は弾性限度に対するもので塑性変形量に対しても当てはまるものではない。

次に弾性係数は繰返し段階1では横弾性係数Gに等しく、繰返し段階2ではGより小さくなっている。これは弾性余効によるひずみ回復現象であると考えられるから、繰返し段階が進行すれば弾性係数は再びGに近づくものと考えられる。

(b) 残留ひずみ

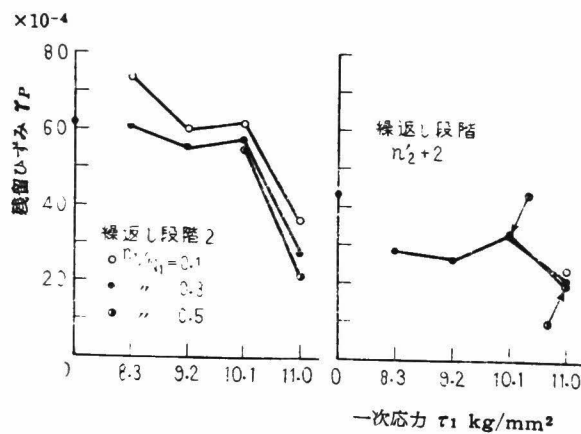
ここで残留ひずみとはヒステリシスループの幅、すなわち第41図におけるAC、CE等を指す。二次応力の各繰返し段階における残留ひずみを第48図に示した。第48図の各図において、繰返し段階1および $n_2' + 1$ の残留ひずみとは第41図のAC、繰返し段階2および $n_2' + 2$ の残留ひずみとは第41図のCE、……を指す。



第48図 各応力段階における残留ひずみ

第48図より言えることは繰返し段階2以後残留ひずみは次第に減少すること、 n_1/N_1 の小さなほど残留ひずみは大であること、一次応力が大きくなると繰返し段階6における残留ひずみの量と繰返し段階 $n_2'+2$ 以後の残留ひずみ量とが等しい値に近づくこと、 $\tau_1 = n_1 = 0$ の場合の繰返し段階2の残留ひずみは一次応力のある場合のそれとあまり変わらないが、繰返し段階 $n_2'+2$ では $\tau_1 = n_1 = 0$ の場合の残留ひずみ量が大になっていること等である。繰返し段階2および $n_2'+2$ における残留ひずみを、一次応力の大きさを横軸にとって表わしたものが第49図である。繰返し段階2では一次応力が大になるほど、また一次応力繰返し数比が大になるほど残留ひずみの量は減少しているが、繰返し段階 $n_2'+2$ では一次応力の n_1/N_1 にはまったく無関係で、一次応力が大きくなるにつれて若干減少する傾向を示している。

したがって、残留ひずみも一次応力から二次応力に切換えたときに、一次応力の大きさおよび一次応力の繰返し数によって影響を及ぼされるが、二次応力を 10^5 回繰返した後は一次応力の影



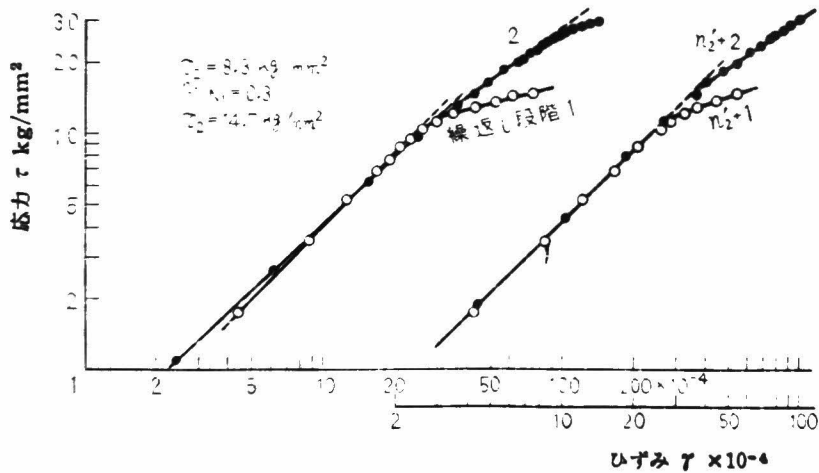
第49図 残留ひずみと一次応力との関係

響はほとんど消失してしまうようである。

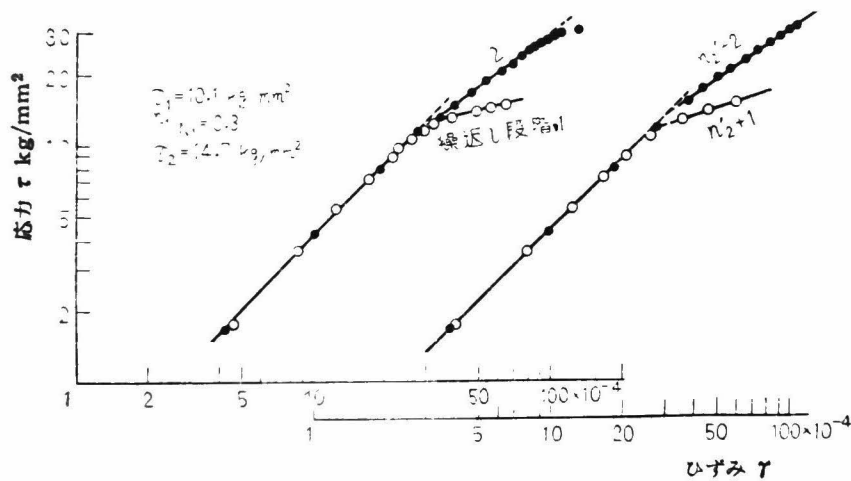
(c) 硬化係数

上述のごとく繰返し段階 $n_2' + 2$ では一次応力が大きくなるにつれ、弾性限度が減少したにも拘らず、残留ひずみは増加せず逆に減少する傾向を有していた。この傾向を説明するために硬化係数なるものを用いて、ヒステリシスループの弾性領域を越えた部分の形状を考えることにする。応力-ひずみ曲線を両対数方眼紙に表わした例を第50図および第51図に示した。ただし繰返し段階2および $n_2' + 2$ の曲線では、すでに述べたように、第41図の点Bを原点とした。これらの曲線における特徴は、応力-ひずみ曲線を両対数方眼紙上で描くと実験の範囲内の応力で2ないし3本の直線にて表わされることである。その最初の直線は応力とひずみが比例する部分で、この直線と次の直線の交点が(a)で求めた弾性限度に一致する。最初の直線の傾きは1かあるいは1に近く、次の直線の傾きは1より小さい。これらの直線は

$$\log \tau = A + \log r \quad (\text{すなわち } \tau = G r) \quad (4)$$



第50図 応力-ひずみ線図



第51図 応力-ひずみ線図

および

$$\log \tau = B + m' \log r \quad (5)$$

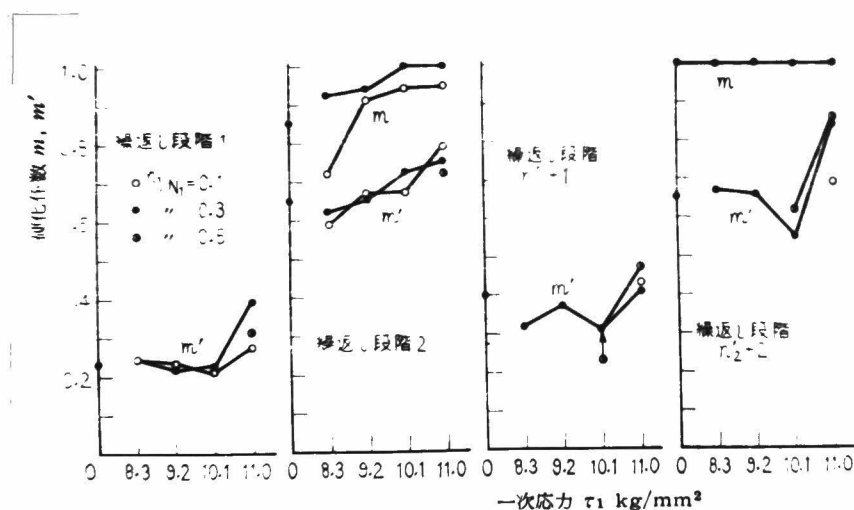
で表わされる。(4)式は応力とひずみが比例関係をもっていることを示す。また(5)式は応力とひずみが指数関係で表わされることを意味する。ただし(4)および(5)式で A , B , τ_0 および r_0 等は各曲線の定数である。繰返し段階1および2では応力-ひずみの関係はひずみが 9.0×10^{-4} を越えると(5)式からはずれて2本の直線で表わされるとは言えないが、繰返し段階 n'_2+1 および n'_2+2 では実験の範囲内では2本の直線となった。本論文における硬化係数とは二つめの直線の傾き、すなわち(5)式の m' を指す。また繰返し段階2においては、すでに述べたように、弾性余効によるひずみ回復のために、最初から(4)式の関係が成立せず

$$\log \tau = A + m \log r \quad (\text{すなわち } \tau = e^A r^m) \quad (6)$$

という形を呈するものがあつた。第50図はその一例である。ひずみ測定装置の取付けの都合上繰返し段階1および n'_2+1 においては $m=1$ とおいたが、前述の如く二次応力の繰返しとともに弾性

係数の値が変化していないから、繰返し段階 $n_2'+1$ で $m=1$ においても大きな誤差は生じていないと考えてよい。(6)式で表わされる m を硬化係数と呼び、(5)および(6)式の m' および m を図示すれば第52図の如くなる。繰返し段階1および $n_2'+1$ では $m=1$ である。また m の値が1より小さくなったのは繰返し段階2においてのみで、一次応力の大きさが大きくなる程、また一次応力の繰返し数比 n_1/N_1 が大きくなる程 m の値は1に近くなっている。すなわち m の値が1に近いほど、一次応力による加工硬化が進んでおいて除荷の際にひずみ回復が起りにくくなるものと考えられる。繰返し段階 $n_2'+2$ では $m=1$ で、一次応力の繰返しの影響は m に関してはなくなっている。

次に硬化係数 m' は一次応力が大きくなるにしたがって大きく なっているが、 n_1/N_1 にはほとんど関係がないようである。第52図の m' によって、弾性限度が減少しても残留ひずみが増大しない理由が明らかになった。また一次応力の繰返しを受けた材料に、二次応力の繰返しを与えても、一次応力による影響はなかなか消失しないことがわかる。



第52図 二次応力でのヒステリシスループにおける硬化係数 m, m'

(d) 疲れ寿命と弾性限度・残留ひずみ・硬化係数およびヒステリシスループが

囲む面積との関係

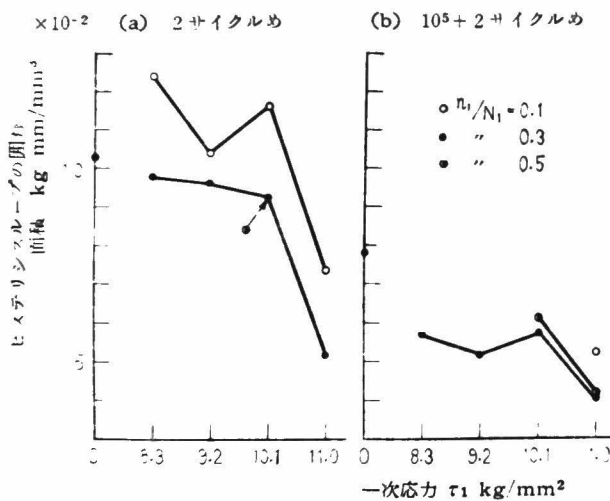
以上考察したように、弾性限度、残留ひずみおよび硬化係数の応力繰返しによる影響は、一次応力から二次応力に切替えたときには、一次応力の大きさおよび一次応力の繰返し数比 n_1/N_1 による影響が見られるが、二次応力を 10^5 回繰返したときには一次応力の繰返し数比による影響は消失し、一次応力の大きさによる影響のみが残っている。第42図より二次応力での寿命の増加は $n_1/N_1=0.1$ および 0.3 のところでは $30\sim40\%$ 増しており、繰返し段階 $n_2'+1$ あるいは $n_2'+2$ で τ_p, τ_p, m, m' が一次応力の繰返し数比の影響を受けないという事と一致している。しかし第42図では一次応力の大きさには関係がなかったが、弾性限度 τ_p 、残留ひずみ τ_p 、および硬化係数 m, m' 等には一次応力の大きさの影響が残っていることは非常に興味あることである。

τ_p, τ_p, m, m' 等はいずれも材料の巨視的性質であって、これらは一次応力から二次応力に切替えたときの過渡的状態では一次応力の大きさおよび繰返し数比 n_1/N_1 によって影響を受けることは当然であって、繰返し段階1および2において、一次応力が大きいとき、 n_1/N_1 が大きいときに材料が硬化するということによって実証された。

繰返し段階 $n_2'+2$ での挙動は上述のとおりであるが、二段二重重複疲れ試験の結果を説明するにはこれらの巨視的性質では不充分であることがわかる。

第47、49および52図を比較すると、一次応力から二次応力に切替えたときには一次応力の大きくなるときおよび繰返し数比の大きくなるときヒステリシスループが囲む面積の大きさが小さくなるが、二次応力を 10^5 回繰返した後は、 n_1/N_1 の大きさによってはヒステリシスループが囲む面積には差が生じないことが予想される。プラニメータによって実測したヒステリシスループが囲む面積の一次応力による変化を第53図に示した。第53図(a)は一次応力から二次応力に切替えた後2サイクル目、および図(b)は二次応力を 10^5 回繰返したのち、応力-ひずみ曲線を測定し始めてから2サイクル目のヒステリシスループが囲む面積を示す。第53図においては 10^5+2 サイクル目のヒステリシスループの面積も一次応力が大きくなるにしたがい減少する傾向のあることを示す。 n_1/N_1 の影響はないように見える。

また一次応力から二次応力に切替えたときの二次応力での面積も二段二重重複疲れ試験の結果を説明するものではなく、明らかに、一次応力の履歴による材料の硬化を説明するだけである。さら



第53図 ヒステリシスループの囲む面積

に第53図(a)の挙動は一次応力の n_1/N_1 が小なるとき（一般に二次応力での疲れ寿命の増加が著しいところ）の方が一次応力の n_1/N_1 が大なるときよりもヒステリシスループが囲む面積が大になるという結果を示す。換言すれば、試験片の一サイクル当り外部から受ける仕事量を表わす面積の大なる方が破壊までの繰返し数が小さくなっていないということである。もちろん、第53図(a)は一次応力から二次応力に切替えたときの過渡的な場合であって、一次応力の大きさおよび n_1/N_1 の影響を直接に受けているから、これによって疲れ寿命との関連を論ずることは無理かもしれない。しかし第53図(a)の挙動がある繰返し数までは持続するものと考え、かつ試験片の各サイクル毎になす仕事量の内、熱となって外部へ逃げる量がおのおの一定と仮定すると、試験片の内部に蓄積されるエネルギーのほとんどが一次応力の履歴で満されなかったところの内部組織の変換に費されるものと解釈される。かつ二次応力の繰返しによって内部に蓄積されるエネルギーが飽和したときに、当然一次応力の条件によって、飽和量が相違することが予想される。この相違が二段二重重複疲れ試

験の疲れ寿命を決定するのではないだろうか。

3・2・3 結 言

黄銅を用いて二段二重重複両振りねじり疲れ試験を行ない、一次応力の大きさおよび一次応力の繰返し数の大きさが、二次応力でのヒステリシスループにどのように影響を及ぼすか、またこのヒステリシスループより求めた面積・弾性限度・残留ひずみおよび硬化係数等の巨視的性質が二段二重重複疲れ試験の結果の特性（一次応力が二次応力より低いときおよび一次応力の繰返し数が小さいとき、疲れ寿命を増大さすという傾向）を説明できるかどうかを研究した。その結果をまとめると次のようになる。

(1) 一次応力から二次応力に切換えたとき、弾性限度は一次応力が大きくなるにしたがって高くなり、その傾向は一次応力の繰返し数比が大きいほど著しい。二次応力のある繰返し数だけ与えたときには一次応力の高い程弾性限度は逆に低下し、一次応力の繰返し数比とは関係がなくなる。

(2) 一次応力から二次応力に切換えたときの二次応力での残留ひずみは一次応力の低いほど、また一次応力の繰返し数比の小さいほど大である。二次応力を一定回繰返した後ではこの傾向は小になる。

(3) 応力-ひずみの関係を両対数方眼紙に描くと、本研究の応力範囲では、応力-ひずみの関係は2本の直線で表わされる。これらの直線の傾きを硬化係数 (m および m') と呼ぶことにすると、一次応力から二次応力に切換えたとき、繰返し段階2では m の値が1より小になるが、これは弾性余効によるひずみ回復のためと思われる。 m' の値は一次応力が大きくなるにしたがい増大するが、繰返し段階 $n_2'+2$ では一次応力の繰返し数の大小によってはほとんど差がない。

(4) 一次応力から二次応力に切換えたときのヒステリシスループの囲む面積は残留ひずみの挙動とほとんど同じ挙動を示す。

(5) これらの材料の巨視的性質の変化の挙動と二段二重重複疲れ試験結果の疲れ寿命とは1対1に対応しないが、これらが二段二重重複疲れ試験の疲れ寿命を決定する種々の要素となっているものであろう。一次応力から二次応力に切換えたときの弾性限度・残留ひずみ・硬化係数およびヒステリシスループが囲む面積の一次応力の履歴による変化の挙動は一次応力の履歴による材料の硬化を示すにすぎない。

3.3 疲れ寿命と塑性ひずみおよび弾性履歴エネルギーとの関係

3.3.1 試験方法

本研究に用いた材料は0.55% C炭素鋼でその化学成分および機械的性質を第7表および第8表に示した。800°C1時間熱後炉内冷却の熱処理を施した後機械加工した。試験片の形状および寸法を第54図に示した。

使用した試験機はHaigh式引張圧縮疲れ試験機で、繰返し速度は毎分1,800回である。実験はすべて両振りで行なつた。ひずみの測定は試験片の変形を2,000倍に拡大する鏡装(33)(36)置を用いて行なつた。装置の詳細については参考文献(35)に詳しく報告されているのでこゝには省略する。試験片にロンパスを取付ける位置は第54図の直径10mmの部分である。ひずみを計算する場合に必要なとする試験片の標点距離としては、平行部分両端の丸味部分を弾性的に平行部分直径と同一の直径に引き直した場合の長さを平行部分に加え、これを有効標点間距離とした。

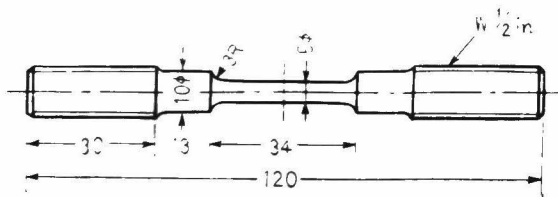
ひずみ測定装置によって測定したひずみ ϵ は弾性ひずみ ϵ_e と塑性ひずみ ϵ_p を含んでいる。定応力試験であるから、弾性係数Eを各試験片について測定することによって ϵ_e を求め、 ϵ から差

第7表 供試材の化学成分(%)

C	Mn	Si	S	P
0.55	0.59	0.21	0.036	0.027

第8表 供試材の機械的性質

σ_{so} (Kg/mm ²)	σ_{su} (Kg/mm ²)	r_B (Kg/mm ²)	σ_T (Kg/mm ²)	ϕ (%)	ψ (%)
34.6	34.2	71.2	98.1	25.0	32.9



第54図 試験片の形状

引いた値を塑性ひずみ ϵ_p とする。したがって前節の残留ひずみ r_p とは本質的に異なった値である。次に弾性履歴 w とは緒言 (3・1) に述べたごとく

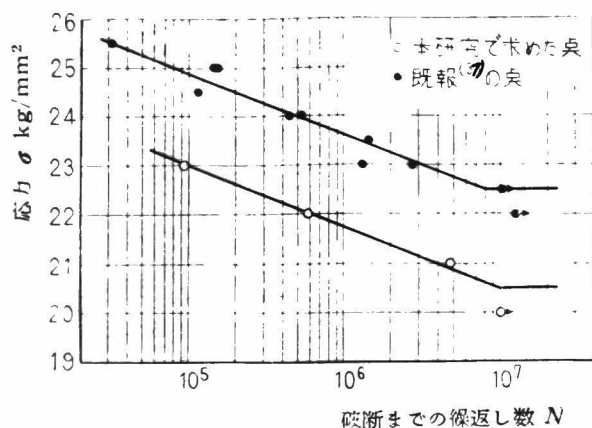
$$w = 4\sigma \epsilon_p \quad (7)$$

とする。この値は前節に述べたヒステリシスループが囲む面積 S とは本質的に異なっているが、ヒステリシスループの形状が疲れの進行とともに著しく変化しないとすれば、 w と S とどちらで論じてても一般性は失われなないといえる。ヒステリシスループの形状が著しく変化するのは破断直前試験片に目に見えるき裂が生じた後であり (第1章参照)、定応力試験ではこのようなき裂発生後の繰返し数は少ないから、疲れ寿命の大部分を通して w の挙動と S の挙動とはほぼ比例するとみなしてよいであろう。なお二段二重重複疲れ試験における弾性履歴エネルギーの値としては、疲れ寿命 (一次および二次応力ではそれらの繰返し数) の半分の繰返し数における塑性ひずみ ϵ_p を用いて (7) 式で計算した。以下に述べる ϵ_p および w はすべてこのようにして求めたものである。

3・3・2 試験結果およびその考察

(a) 応力一段の結果および考察

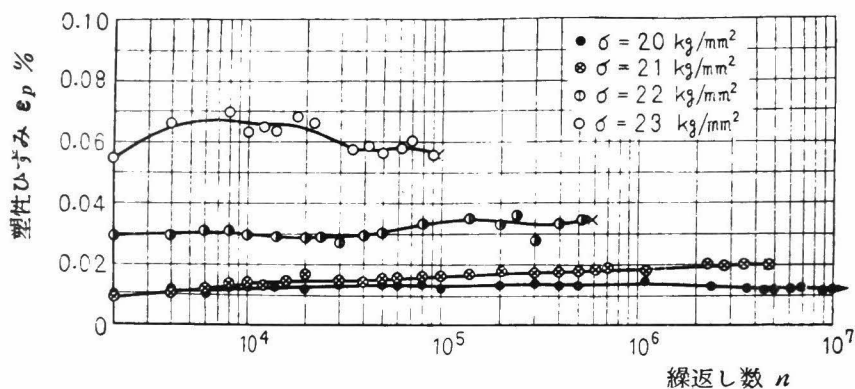
応力一段の試験結果を第55図に示した。図中黒丸は他の実験者による結果であり、白丸4点は本研究で求めた結果である。同図において二つの結果はほとんど平行な二本の直線で表わされ、黒丸の方が応力値で 1.9 kg/mm^2 高くなっている。この差異は、試験機の荷重検定および実験者が変



第55図 応力一段のS-N曲線

ったことによるものと思われる。もち論本節では本研究で求めた白丸で表わされる結果を採用する。第56図は応力一段の場合の塑性ひずみ ϵ_p の応力繰返し数 n に対する変化のようすを示したものである。応力繰返しに伴って塑性ひずみは若干増加する傾向を示すがその変化は微小である。応力 23 kg/mm^2 では ϵ_p の値がかなりばらついているが、これは応力が高いために材料が不安定な状態にあるためであろう。

破断までの繰返し数の50%の繰返ししのところの塑性ひずみ ϵ_p と破断までの繰返し数 N との関係は第57図に ϵ_p - N 曲線として示した。また弾性履歴エネルギーと破断までの繰返し数 (w - N) 曲線を第58図に示した。(37) 両図において黒丸は既報の結果であり、白丸は本研究で求めた結果である。また ϵ_p - N 曲線および w - N 曲線は(2), (3)式にこだわることなく、実験点のほぼ中心を通るように描いた。S-N 曲線に比較して ϵ_p - N 曲線および w - N 曲線では白丸と黒丸はよく一致して一つの曲線上に載っており、ひずみの測定値は試験機の検定、実験者の相違等による誤差がないことを示している。



第56図 応力一段の塑性ひずみの繰返しに伴う変化

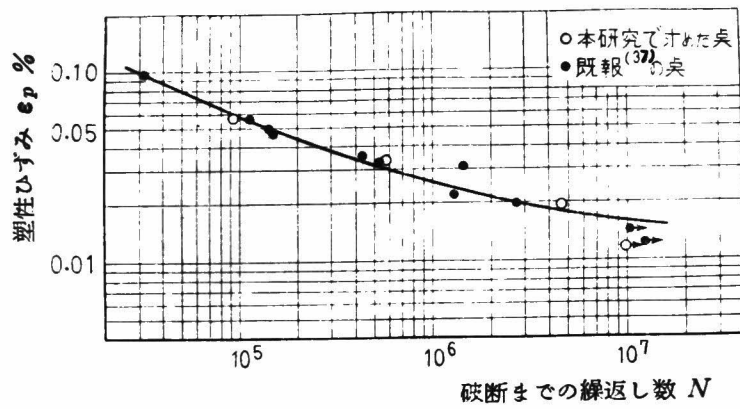
(b) 二段二重重複荷重における塑性ひずみおよび弾性エネルギー

の変化

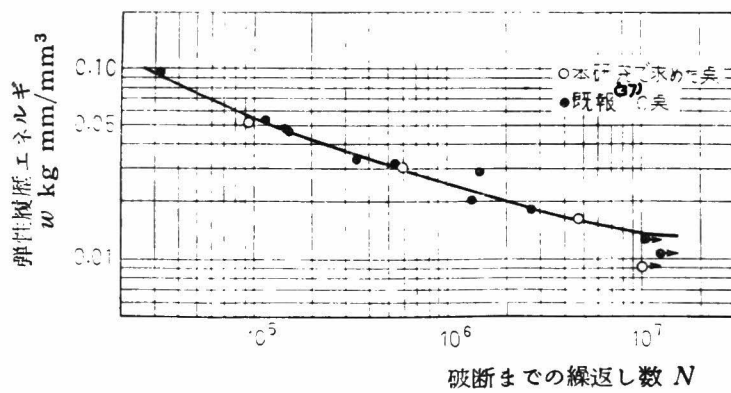
二段二重重複試験としては、一次応力 σ_1 ，二次応力 σ_2 に21，22，23 kg/mm^2 を選び，かつ一次応力の繰返し数 n_1 に第55図のS-N曲線より求めた破断までの繰返し数 N_1 の $1/2$ ， $1/6$ および $1/20$ をとった。第9表に二段二重重複疲れ試験の結果を表示した。

表中「S-N曲線より， n_1/N_{s1} ， n_2/N_{s2} 」とあるのは応力一段のS-N曲線より求めた一次および二次応力の破断までの繰返し数 N に対する繰返し数比を示している。 n/N_{ϵ_p} および n/N_w はそれぞれ ϵ_p -N曲線および w -N曲線より求めた繰返し数比を示している。塑性ひずみ ϵ_p ，弾性履歴エネルギー w は試験方法の項でも述べた如く， n_1 および n_2 の $1/2$ のところの値をとってある。

第59，60，61図は二段二重重複疲れ試験における応力繰返しに伴う塑性ひずみの変化を，横軸に繰返し数比をとって示したものである。ただし一次応力側の繰返し数比とは一次応力繰返し



第57図 応力一段の ϵ_p - N 曲線



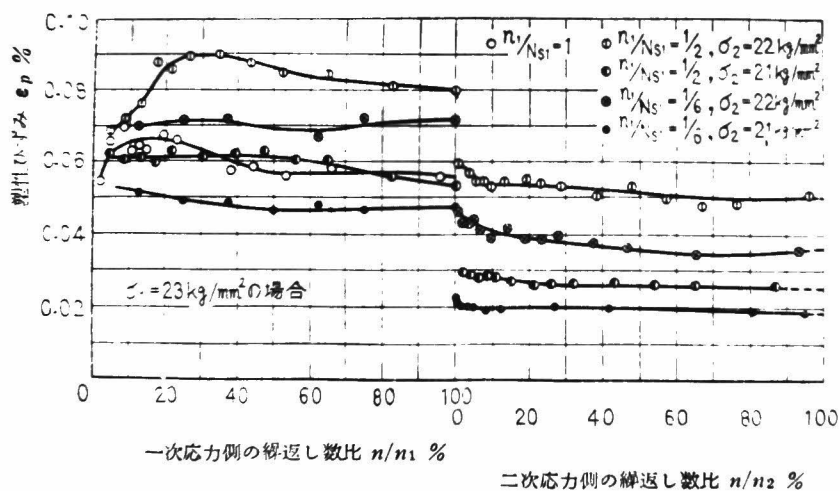
第58図 応力一段の w - N 曲線

第9表 二段二重疲れ試験結果

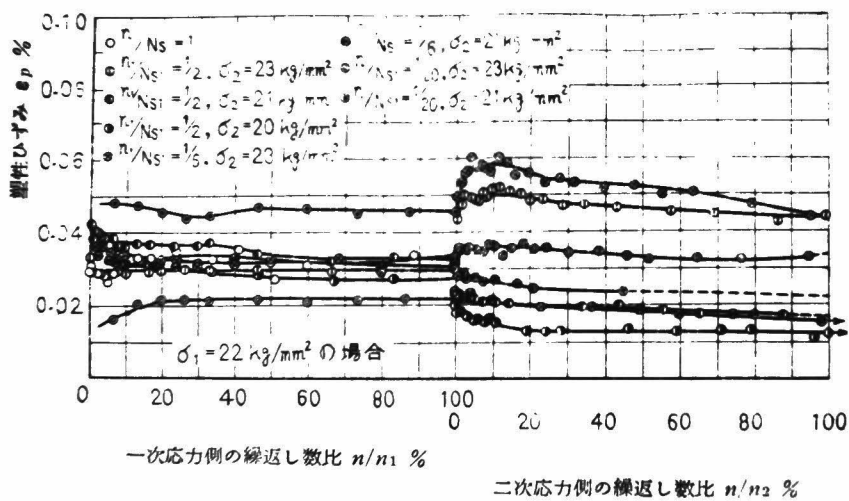
	応力 σ_1, σ_2 (Kg/mm ²)	繰返し数 n_1, n_2	S-N曲線 より n/N_s	塑性ひずみ ϵ_p (%)	ϵ_p -N 曲線より $n/N_{\epsilon p}$	弾性履歴エ ネルギー (Kg-mm ³ /mm ³)	w-N曲線 より n/N_w
一次	22	1×10^5	0.17	0.0312	0.185	0.0276	0.122
二次	23	252 "	2.68	0.0508	1.812	0.0467	1.604
一次	22	1 "	0.17	0.0320	0.200	0.0291	0.162
二次	21	>98.8 "	>2.08	0.0187	>2.464	0.0157	>1.980
一次	22	3 "	0.50	0.0350	0.792	0.0308	0.602
二次	21	18.2 "	0.38	0.0190	0.479	0.0160	0.387
一次	22	3 "	0.50	0.0297	0.480	0.0261	0.345
二次	23	346 "	3.68	0.0463	1.955	0.0426	1.730
一次	22	3 "	0.50	0.0287	0.424	0.0252	0.315
二次	20	>100 "	>1	0.0130	>1	0.0104	>1
一次	22	1 "	0.17	0.0218	0.050	0.0192	0.042
二次	21	>100 "	>2.18	0.0134	>1	0.0113	>1
一次	22	0.3 "	0.05	0.0214	0.014	0.0188	0.015
二次	23	6.54 "	6.95	0.0337	1.522	0.0310	1.310
一次	22	0.3 "	0.05	0.0460	0.166	0.0405	0.133
二次	21	18.08 "	0.38	0.0241	1.360	0.0202	0.940
一次	23	0.46 "	0.50	0.0850	1.070	0.0782	1.026
二次	22	1.04 "	0.18	0.0500	0.697	0.0440	0.574
一次	23	0.46 "	0.50	0.0618	0.517	0.0569	0.510
二次	21	0.92 "	0.02	0.0259	0.092	0.0218	0.058
一次	23	0.16 "	0.17	0.0710	0.250	0.0652	0.245
二次	22	2.14 "	0.37	0.0368	0.665	0.0324	1.070
一次	23	0.16 "	0.17	0.0491	0.107	0.0452	0.094
二次	21	28.14 "	0.59	0.0187	0.702	0.0157	0.663
一次	21	23.6 "	0.50	0.0200	0.797	0.0168	0.612
二次	22	13.02 "	2.23	0.0286	1.830	0.0252	1.303
一次	21	7.8 "	0.17	0.0212	0.346	0.0178	0.248
二次	23	1.28 "	1.36	0.0620	1.450	0.0570	1.420
一次	21	23.6 "	0.50	0.0210	0.983	0.0176	0.715
二次	23	2.58 "	2.75	0.0421	1.217	0.0386	0.996
一次	21	7.8 "	0.17	0.0258	0.864	0.0225	0.557
二次	22	6.42 "	1.10	0.0375	2.080	0.0330	1.569

(注) 耐久限以下においては N_s 、 $N_{\epsilon p}$ 、 N_w の値をそれぞれ 10^7 として計算した。

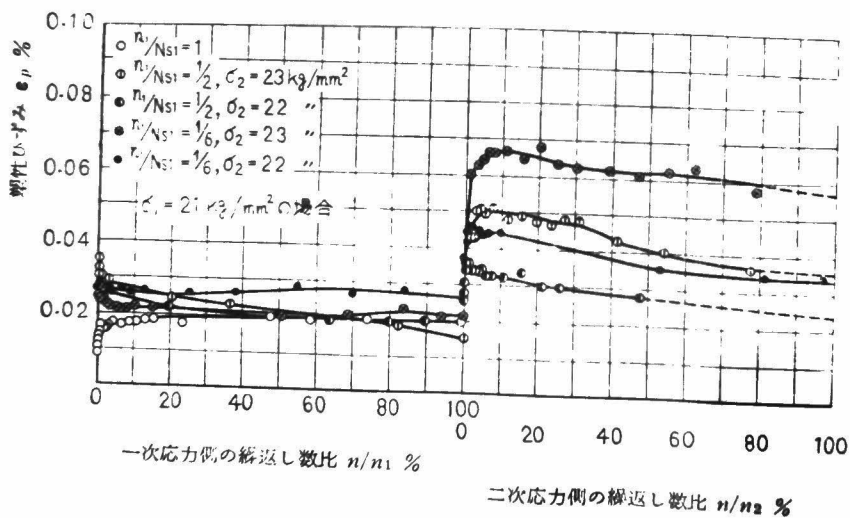
数 n_1 に対する塑性ひずみ測定時の繰返し数 n の比である。二次応力側の繰返し数比とは二次応力に切換えてから破断までの繰返し数 n_2 に対する塑性ひずみ測定時の二次応力に切換えた後の繰返し数 n の比である。第 59 図は $\sigma_1 = 2.3 \text{ Kg/mm}^2$ ，第 60 図は $\sigma_1 = 2.2 \text{ Kg/mm}^2$ ，および第 61 図は $\sigma_1 = 2.1 \text{ Kg/mm}^2$ に対するものである。これら 3 図において一次応力側だけにある白丸は応力一段の時の塑性ひずみの変化を記入したものであるが、白丸の ϵ_{p-n}/N の変化の挙動と二段二重重複疲労試験の一次応力側の ϵ_{p-n}/n_1 の変化の挙動の間には著しい差はないようである。第 59 図の $\sigma_1 = 2.3 \text{ Kg/mm}^2$ の場合に一次応力側の ϵ_p の値が非常にばらついているが、これは前述のごとく、応力が高いために生ずる材料の不安定性によるものである。しかし一次応力 $\sigma_1 = 2.2 \text{ Kg/mm}^2$ および 2.1 Kg/mm^2 における一次応力側の塑性ひずみの変化は第 56 図に示した応力一段の場合と同様、応力繰返しによって著しい変化を示していないことがわかる。



第 59 図 二段二重荷重下における ϵ_{p-n}/n_1 ， ϵ_{p-n}/n_2 曲線

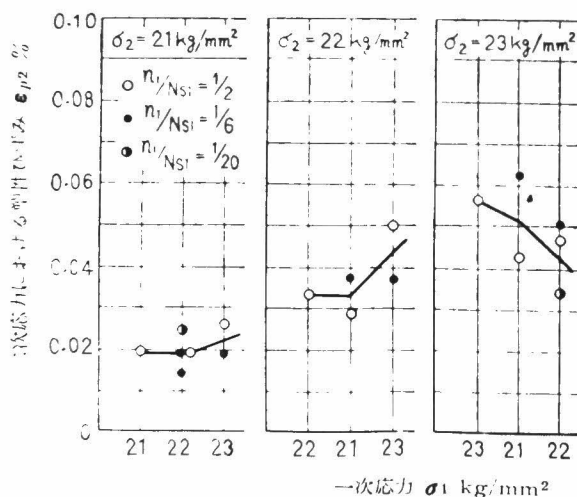


第60図 二段二重荷重下における ϵ_{p-n/n_1} , ϵ_{p-n/n_2} 曲線



第61図 二段二重荷重下における ϵ_{p-n/n_1} , ϵ_{p-n/n_2} 曲線

二次応力においては $\sigma_1 > \sigma_2$ の場合には一次応力における塑性ひずみ ϵ_{p1} に比較して二次応力における塑性ひずみ ϵ_{p2} は当然小さくなっている。しかしその減少のし方は n/n_2 が数%の範囲で ϵ_{p2} が ϵ_{p1} より激減した後 ϵ_{p2} の減少は $n/n_2 \div 20\%$ まで徐々に生じ、 $n/n_2 > 20\%$ では一定値に達しているようである。 $\sigma_1 > \sigma_2$ の場合には $\epsilon_{p1} < \epsilon_{p2}$ となっているが、 n/n_2 がほぼ10%まで ϵ_{p2} は増加し、後破断まで ϵ_{p2} の値は徐々に減少している。3・2に述べた黄銅の場合には $\sigma_1 < \sigma_2$ の場合のみを研究したが、いずれも一次応力から二次応力に切換えて後残留ひずみ r_p （ヒステリシスループの幅）は増加する現象は見られなかったが、これは材料の相違によるものであろう。第56図に示した応力一段の場合には、応力繰返しに伴って ϵ_p は若干ずつ増加したが、二次応力側では $\sigma_1 < \sigma_2$ の場合にも $\sigma_1 > \sigma_2$ の場合にも ϵ_p は応力繰返しに伴って減少している。これらはいずれも一次応力の繰返しによる影響である。 n/n_2 の値が小なところで $\sigma_1 < \sigma_2$ の時には ϵ_p が増加し、 $\sigma_1 > \sigma_2$ の時には ϵ_p が減少するという現象は、一次応力から二次応力に切換えた時の過渡的現象であると同時に、二次応力での塑性ひずみが一次応力によって拘束されていることを示している。

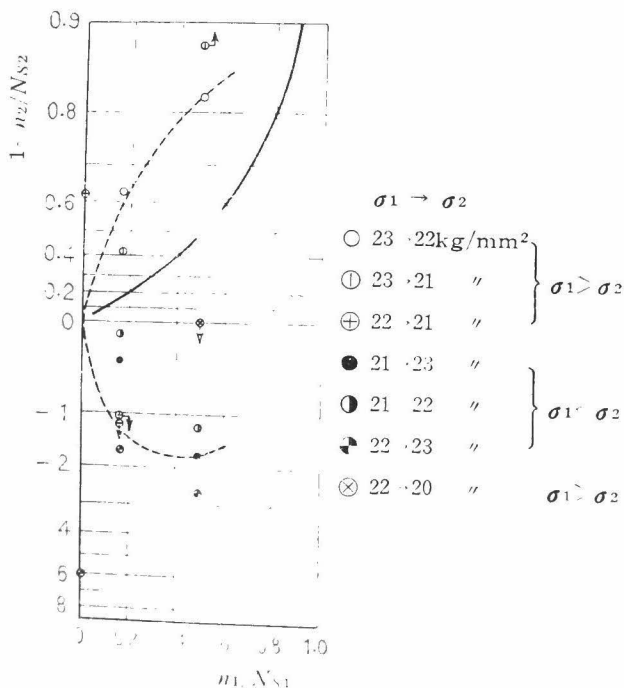


第62図 二次応力における塑性ひずみに及ぼす一次応力の影響

第62図は二次応力における塑性ひずみ量（ただし $n/n_2 = 0.5$ における） ϵ_{p2} に及ぼす一次応力の大きさの影響を示したものである。試験結果は若干ばらついているが、 $\sigma_1 > \sigma_2$ の場合には上述のごとく ϵ_{p2} の値は応力一段の場合の塑性ひずみ量 ϵ_p より大になっている。一方 $\sigma_1 < \sigma_2$ の場合には ϵ_{p2} の値は応力一段の塑性ひずみ量 ϵ_p より小になっており（参考文献（22）も同じ傾向を示す）、一次と二次応力の応力差の大きいものほどその傾向は大である。一次応力の繰返し数比と二次応力における塑性ひずみとの関係を強いて見いだすことはできない。

(c) 二段二重重複荷重における疲れ被害曲線

応力一段の S-N 曲線より求めた疲れ被害曲線を第63図に示した。第7表の n/N_s を見れば

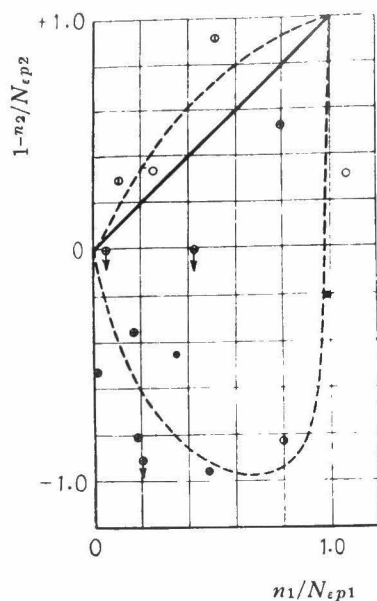


第63図 S-N曲線より求めた疲れ寿命比曲線

$\sigma_1 = 22$, $\sigma_2 = 23 \text{ Kg/mm}^2$, $n_1/N_1 = 1/20$ の試験片では $n_2/N_2 = 6.96$ となり普通の疲れ被害の表わし方では表わせないので、第63図では n_2/N_2 を対数で表わして縦軸にとった。図中太実線は直線被害法則に従うときの理論値である。同図より $\sigma_1 < \sigma_2$ の場合には例外なく直線被害法則より求められる疲れ寿命より疲れ寿命は増大しているが、 $\sigma_1 > \sigma_2$ の場合には $\sigma_1 = 22$, $\sigma_2 = 21 \text{ Kg/mm}^2$ の2点および $\sigma_1 = 22$, $\sigma_2 = 20 \text{ Kg/mm}^2$ の1点、計3点を除いて $\sum (n_i/N_i) < 1$ となっている。またこれら3点の例外は二次応力において繰返し数が 10^7 を越えている。第55図より判断して耐久限度に近いため生ずるばらつきによるものと考えられる。第63図の疲れ被害曲線では一次応力の大きさによる差はあまり見られず、前節の黄銅の結果と一致している。たゞ $\sigma_1 < \sigma_2$ の場合の寿命の増加はねじりの結果に比較して引張圧縮の結果は大であり、本材料の引張圧縮試験では一次応力の繰返しが二次応力での疲れ寿命に及ぼす影響が大であることを示すものであろう。

第62図に示した二次応力での塑性ひずみの一次応力の大きさによる傾向は第63図のS-N曲線より求めた疲れ被害曲線の傾向を説明するのに都合がよい。すなわち $\sigma_1 < \sigma_2$ の時、疲れ寿命が増加するが、このときは二次応力での塑性ひずみが減少するからであり、 $\sigma_1 > \sigma_2$ の時は疲れ寿命は減少するが、この時には二次応力での塑性ひずみが増加するからである、と説明できる。しかし前節においてすでに述べたように、黄銅においてはこの傾向は異なっていたことに注意すべきである。

今、 $n/n_1 = 0.5$ および $n/n_2 = 0.5$ のところの塑性ひずみ（第9表の \mathcal{E}_p の列）を求め第57図の \mathcal{E}_p -N曲線よりこれらの \mathcal{E}_p に相当する破断までの繰返し数を推定し、一次および二次応力の繰返し数比を計算したものを第9表の $n/N_{\mathcal{E}_p}$ の列に示した。このようにして求めた疲れ被害の関係を第64図に示した。 $n_1/N_{\mathcal{E}_{p1}}$ の値が n_2/N_{s1} に比較してかなりばらつき、 $n_1/N_{\mathcal{E}_{p1}} > 1$ の場合も生じている。しかし $\sigma_1 > \sigma_2$ の結果はほぼ直線被害法則に従うようである。かつS-N曲線より求めた $\sum (n_i/N_{s_i})$ が ($\sigma_1 > \sigma_2$ の場合) 1より大になった3点はこの場合にも1より大になっている。次に $\sigma_1 < \sigma_2$ の場合には例外なく $\sum n_i/N_{\mathcal{E}_{p_i}}$ の値は1より大であるが、その値は $\sum n_i/N_{s_i}$ の値よりはるかに1に近い。このことは第62図の結果よりすでに説明した事である。しかし $\sum n_i/N_{\mathcal{E}_{p_i}}$ の値が1に等しくないということは、一次応力の繰返しを受けた材料が二次応力の繰返しを受ける際に生ずる塑性ひずみが、第57図の応力一段の時の \mathcal{E}_p -N曲線とは



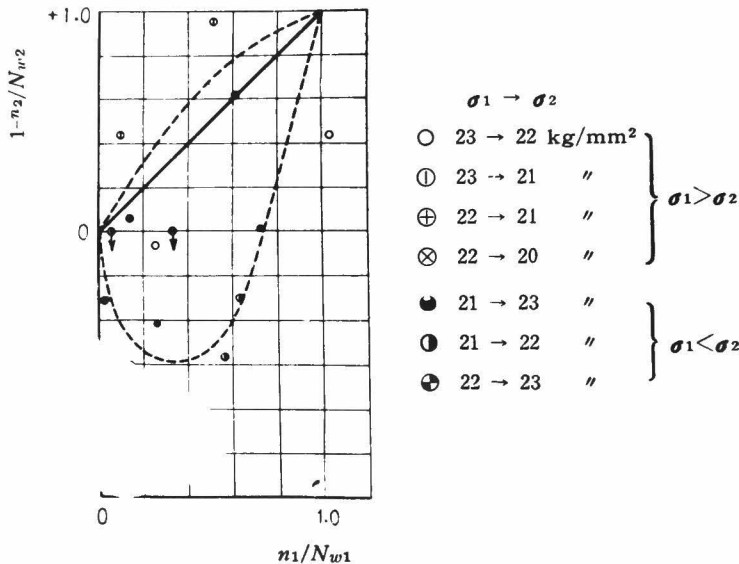
第64図 ϵ_p - N 曲線より求めた疲れ寿命比曲線

異なった挙動を示していることを意味するものである。すなわち、たとえば $\sigma_1 < \sigma_2$ の場合に、二次応力での塑性ひずみの量が処女材の同一応力に対する塑性ひずみの量よりも小さくなっているが、二次応力での塑性ひずみ量を第57図にプロットすると、応力一段の時の ϵ_p - N 曲線よりも上の方に来ることを意味する。この現象の解明は今後の研究に待つところであるが、これが二段二重重複疲れの場合の寿命の増加を説明するものであらうと思われる。

次に $n/n_1=0.5$ および $n/n_2=0.5$ のところにおける塑性ひずみ ϵ_p と負荷応力 σ とより(7)式を用いて求めた弾性履歴エネルギー w の値を第(9)表の弾性履歴エネルギー w の列に示した。第58図の w - N 曲線より、これらの w に相当する破断までの繰返し数(疲れ寿命) N_w を推定し、一次および二次応力での応力繰返し数比 n_1/N_{w1} および n_2/N_{w2} を計算したものを第(9)表 n/N_w の列に

示した。このように $w-N$ 曲線より求めた二段二重重複疲れの疲れ被害の関係を第 6 5 図に示した。第 6 4 図の ϵ_p-N 曲線より求めた疲れ被害曲線よりさらに $\Sigma n_i / N_{wi}$ の値は 1 に近くなっているが、その傾向は第 6 4 図の場合とまったく良く似ている。

ϵ_p-N 曲線および $w-N$ 曲線より求めた $\Sigma n_i / N_{\epsilon p i}$ および $\Sigma n_i / N_{wi}$ の値が、 $\sigma_1 < \sigma_2$ のときは 1 より大きくなり、 $\sigma_1 > \sigma_2$ の時はほぼ 1 に近い値あるいは 1 よりわずかに小さい値になっているが、いずれのときにも $\Sigma n_i / N_{si}$ の値よりも 1 に近い。いずれの場合にも 1 になっていないということは、疲れ寿命の算出に当って、 ϵ_p-N 曲線あるいは $w-N$ 曲線を用いても直線被害法則に従わないということを示すものであり、また、二次応力における ϵ_p および w の値は一次応力の繰返しによって、応力一段の場合における ϵ_p-N および $w-N$ 曲線上には載ってこないこと



第 6 5 図 $w-N$ 曲線より求めた疲れ寿命比曲線

を意味するのである。

(d) 疲れ寿命と弾性履歴エネルギーとの関係

上述の事がらは前節においても述べたように一次応力の大きさおよび一次応力の繰返し数比によって、二次応力での巨視的性質が変化し応力一段の場合とはまったく異なった挙動を示すことによるものである。したがって応力が二段の場合に限らず疲れ被害の応力繰返しに伴う進行を明らかにすること、一次応力の繰返しによって影響される二次応力における塑性ひずみや弾性履歴エネルギー、その他巨視的変形の挙動あるいは組織学的変化の挙動を明らかにすることが、二段二重重複疲れあるいはその他の実働荷重による疲れの現象を説明する有効な手懸りであろう。

さて、すでに述べた如く応力一段の引張圧縮疲れ試験における弾性履歴エネルギー w と破断までの繰返し数 N との間には(3)式の関係、すなわち

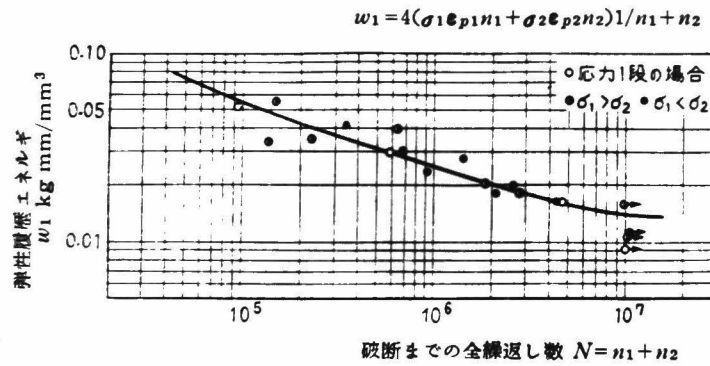
$$w \cdot N^\beta = C \quad (3)$$

(3)(36) が成立した。定数 C は各材料によって異なるが、 N のべき数 β は各種の炭素鋼、 C_r-M_0-V 鋼に対して共通な $\beta=0.42$ という値であった。 $n/N=0.5$ のところの弾性履歴エネルギー w が定められ破断までの繰返し数 N が求められることを(3)式は示している。それならば二段二重重複疲れ試験の場合、弾性履歴エネルギー w と破断までの繰返し数の間にはいかなる関係が存在するであろうか。すでに述べたように、二次応力における塑性ひずみは応力一段の $w-N$ 曲線上には載らない。

まず最初に $N=n_1+n_2$ とおき

$$w_1 = 4(\sigma_1 \epsilon_{p1} \frac{n_1}{N} + \sigma_2 \epsilon_{p2} \frac{n_2}{N}) \quad (8)$$

の関係で二段二重重複疲れの場合の弾性履歴エネルギー w_1 と破断までの繰返し数 $N (=n_1+n_2)$ の関係を表わすことにする。(8)式における弾性履歴エネルギー w_1 は一次応力と二次応力における弾性履歴エネルギー $4\sigma_1 \epsilon_{p1}$ および $4\sigma_2 \epsilon_{p2}$ を繰返し数 n_1 および n_2 の比で内分したものの和である。(8)式によって求められた結果を第56図に示した。図において白丸は応力一段における結果であり、黒丸は $\sigma_1 < \sigma_2$ の結果および半黒丸は $\sigma_1 > \sigma_2$ の結果を示している。また曲線は第58図の曲線と同一のものである。第56図において w_1 の高いところでは実験結果に若干のばらつきがあるが一次応力と二次応力の差 $|\sigma_1 - \sigma_2|$ が 1 Kg/mm^2 のときにも 2 Kg/mm^2 のときにも、また $\sigma_1 > \sigma_2$ の場合にも $\sigma_1 < \sigma_2$ の場合にも、応力一般のときの w_1-N 曲線の周囲に同じ程度に



第66図 二段二重重複試験における $w_1 - (n_1 + n_2)$ 曲線

ばらついており、有意な差があるとは言えないようである。

次に一次応力の繰返しによって直線的に被害を受けていると考え、一次応力の繰返し数を二次応力での繰返し数に換算し、弾性履歴エネルギー w と破断までの繰返し数 N との関係式として

$$w_2 = 4 \left(\sigma_1 \epsilon_{p1} \frac{n_1}{N_1} + \sigma_2 \epsilon_{p2} \frac{n_2}{N_a} \right) \quad (9)$$

$$N_a = N_2 \frac{n_1}{N_1} + n_2 \quad (10)$$

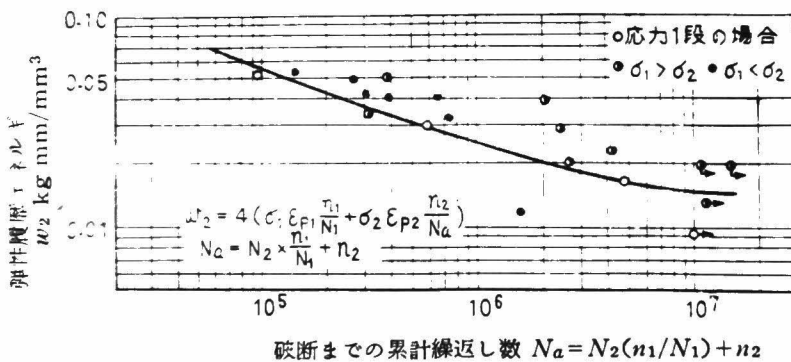
を仮定する。破断までの繰返し数として(10)式の N_a を採用する。(9)式は主として二次応力における弾性履歴エネルギーを考えて導いたものである。(9)式によって求められた w_2 と N_a との関係を第67図に示した。同図において $\sigma_1 > \sigma_2$ に対しては N_a の大きい方に、 $\sigma_1 < \sigma_2$ の結果は N_a の小さ

いほうに偏っているがそれは(10)式のためである。 $\sigma_1 > \sigma_2$, $\sigma_1 < \sigma_2$ いずれの場合にも弾性履歴エネルギー w_2 は応力一段の場合の $w-N$ 曲線よりも上方にきている。この理由は前述のごとく、 $\sigma_1 > \sigma_2$ の場合には(9)式における ϵ_{p2} が応力一段の場合の塑性ひずみ ϵ_p より大きくなっていること、および $\sigma_1 < \sigma_2$ のときには ϵ_{p2} は ϵ_p より小であるが、(9)式において n_2/N_a が寿命増大のため1に近づいているため、いずれも応力一段の場合の $w-N$ 曲線よりも上のほうに来るのである。この場合にも直線被害法則を使用することができないのが明らかである。

次に、二次応力における塑性ひずみ ϵ_{p2} は一次応力の繰返しの影響を受けて処女材の塑性ひずみの挙動とは異なっていた。今一次応力側を無視して、二次応力側の弾性履歴エネルギーと破断までの繰返し数のみを考えて

$$w_2 = 4 \sigma_2 \epsilon_{p2} \quad (11)$$

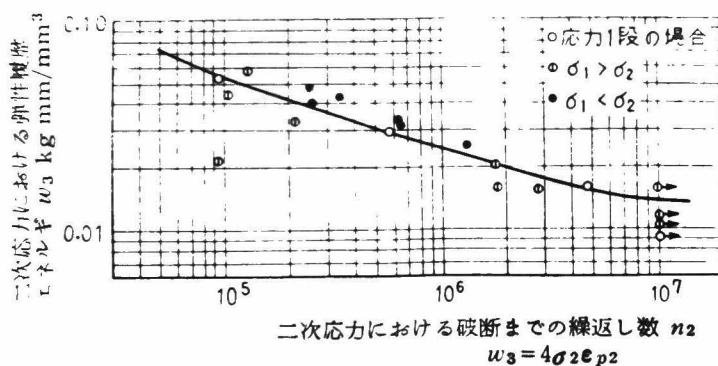
とする。この関係を図示したものが第68図である。横軸の破断までの繰返し数としては応力一段の場合は N 、応力二段の場合は n_2 を用いた。図中の実線は前2図と同様応力一段の場合の $w-N$



第67図 二段二重重複試験における $w_2 - N_a$ 曲線

曲線 (第58図) である。 $\sigma_1 > \sigma_2$ の場合には ϵ_{p2} が応力一段の場合の同一応力に対する塑性ひずみ ϵ_p より大で、かつ二次応力の疲れ寿命が直線被害法則より計算される疲れ寿命より小であるが、これらのことが互に打消し合わず、 $w_3 - n_2$ の関係は応力一段の場合の $w-N$ 曲線より下にでており、寿命の低下が著しいことを示す。また $\sigma_1 < \sigma_2$ の場合には逆に $w_3 - n_2$ の関係は応力一段の $w-N$ 曲線より上にきている。これらのことは塑性ひずみの挙動について述べたごとく、疲れ寿命が減少するか増加するかによって、二次応力における塑性ひずみの挙動が応力一段の場合の $\epsilon_p - N$ 曲線および $w-N$ 曲線とは異なった挙動を有していることを示すものである。

したがって二段二重重複疲れ試験において弾性履歴エネルギーと破断までの繰返し数の関係は(8)式で表わす方が、現在の段階では適当であると思われる。しかし一つ一つの材料について塑性ひずみを疲れ試験の間測定しなければならず、またたとえ測定できたとしても、疲れの進行に伴って塑性ひずみが増加するという現象があるため応力段階が始終変化する多段多重あるいは実働荷重の場合にはどのように計算するかという疑問や欠点がある。



第68図 二段二重重複試験における $w_3 - n_2$ 曲線

3・3・3 結 言

0.5 5 % C炭素鋼を用い、二段二重重複疲れ試験を引張圧縮で行なって、応力繰返しに伴う試験片のひずみ変化の挙動を研究した。その結果次のような結果を得た。

- (1) 本研究に用いた材料では応力一段の時の塑性ひずみの変化は、寿命の大部分を通じてほぼ一定で若干増加する傾向が見られた。
- (2) 二段二重重複疲れ試験において、二次応力における塑性ひずみは、 $\sigma_1 > \sigma_2$ の場合には n/n_2 がほぼ 20 % まで減少し、後破断まで一定値を保つ。一方 $\sigma_1 < \sigma_2$ の場合には n/n_2 がほぼ 10 % まで増加し、後破断まで徐々に減少するという傾向を示した。応力一段の場合の塑性ひずみの挙動とはまったく変っている。
- (3) S-N 曲線より求めた疲れ被害曲線よりも、 ϵ_p -N 曲線あるいは w -N 曲線から求めた疲れ被害曲線の方が $\sum n_i / N_i$ の値が 1 に近い。このことは二次応力における塑性ひずみあるいは弾性履歴エネルギーの変化の挙動が、一次応力の繰返しを受けて処女材が示すそれらとは異なったものになっており、この変化量と二次応力における寿命の増大あるいは減少と密接な関係を持っていることを示すものである。すなわち一次応力 σ_1 が二次応力 σ_2 より大きいときには、二次応力での塑性ひずみ ϵ_{p2} は応力一段の場合の塑性ひずみ ϵ_p より大きくなる傾向を示し、 $\sigma_1 < \sigma_2$ の時には $\epsilon_{p2} < \epsilon_p$ となる傾向を示した。これらの傾向は応力切換えの際の過渡的現象だけで説明できるものではなく、一次応力の影響を受けて材料の変形抵抗がすっかり変化してしまっていることを示す。
- (4) 弾性履歴エネルギー w を(8)式で表わしたときには、二段二重重複疲れ試験の結果が、応力一段の場合の w -N 曲線とほぼ一致することが明らかになった。

3・4 二次応力における塑性ひずみ振幅の変化

3・4・1 試験方法

前節に引き続いて本節においても一次応力を受けた試験片が二次応力においていかなる塑性ひずみの変化を示すか、また二次応力における塑性ひずみ ϵ_{p2} が一次応力の大きさおよび一次応力での塑性ひずみ ϵ_{p1} といかなる関係を有するかについて研究する。

使用した試験機は Haigh の引張圧縮疲れ試験機、繰返し速度は毎分 1,800 回である。ひずみ

の測定法は前節に述べた光てこ法を用いた。試験片の形状寸法は第54図に示したとおりである。

供試材料は0.28% C炭素鋼で、860℃1時間加熱後炉内冷却した。その化学成分を第10表に、機械的性質を第11表に示した。前節で用いた0.55% C炭素鋼の結果をも用いて考察する。

3・4・2 試験結果および考察

(a) 応力一段のとき

両振り応力を試験片に与えたときには、いわゆる疲れ変形は生じないが、材料が疲れの進行とともに広義の内部組織の変化を起し、ひずみ振幅が変化することはすでに多くの研究者が報告し、また前節や第一章においても述べた通りである。

0.55% C炭素鋼の応力一段の両振り引張圧縮疲れ試験においては、塑性ひずみ振幅 ϵ_p は全寿命を通じてほぼ一定かあるいは徐々に増加の傾向を示したが、その増加の割合はいたって小である

第10表 供試材の化学成分 (%)

C	Mn	Si	S	P
0.28	0.39	0.24	0.023	0.015

第11表 供試材の機械的性質

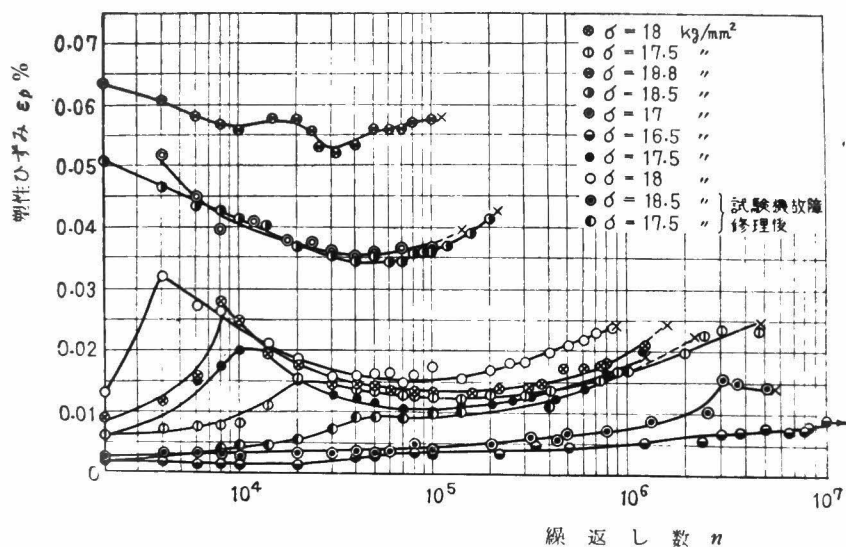
σ_{so} (Kg/mm ²)	σ_{su} (Kg/mm ²)	σ_B (Kg/mm ²)	σ_T (Kg/mm ²)	ϕ (%)	ψ (%)
28.4	21.4	33.9	42.5	30.6	55.1

(第56図)。ところが0.28% C鋼においては第69図に示すように塑性ひずみ振幅 ϵ_p の変化は著しく、繰返しの初期に急増し、極大値を経た後急減し、全寿命のはゞ10%辺りで最小となつて再び塑性ひずみは増加して破断にいたっている。また負荷応力が大になると繰返しの初期に ϵ_p

が増加する現象は消失して最初から ϵ_p は減少している。

このような現象は第一章の軟鋼のねじり試験においてすでに示した。

軟鋼のとき示すこのような塑性ひずみ振幅の複雑な変化は、次のように解釈することができる。最初材料は繰返し応力を受けて塑性変形が容易に生ずるように変形し、これが繰返し初期に生ずる材料の軟化現象となっている。この軟化現象は材料の降伏点と関係すると考えられ、降伏点の近くまで応力を上げると材料の σ り現象が容易に且つ少ない繰返し数の内に生じて材料の軟化現象を観察しにくくなる。これに反し負荷応力が低いと材料全体の降伏がかんまんになって軟化現象はゆるやかに生ずるものと考えられる。次いで材料は繰返し応力を受けるに従い加工硬化し塑性ひずみが急激に減少すると考えてよい。繰返し応力が大きい程塑性ひずみの極大値が小さくなることから上(51)のように考えてよいと思う。加工硬化を受けると同時に材料の結晶粒は碎片化し、集積した σ り帯

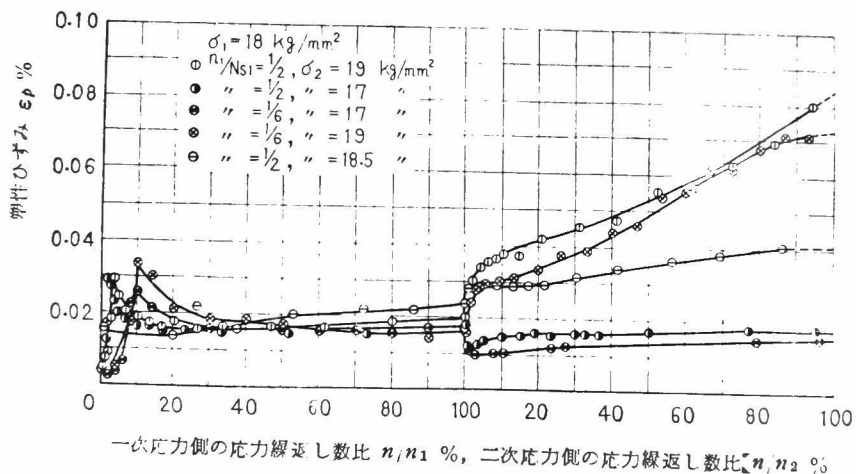


第69図 応力一段の塑性ひずみの繰返しに伴う変化

(52)
 の中に微小き裂が発生して、塑性ひずみ振幅増加の原因となり、これが破断まで続くものと考えられる。曲げやねじり疲れ試験においては最大応力の表面に微小き裂が生じても試験片断面全体に及ぼす影響は少なく破断直前においてのみひずみ振幅の変化が認められた。しかしこれらの塑性ひずみ振幅の変化から微小き裂発生の時期、結晶碎片化の状況を判ずることはできない。また0.28% C炭素鋼ではこのように塑性ひずみ振幅の変化がかなり明瞭に現われるが、0.55% C炭素鋼ではその変化がほとんど現われておらず、繰返し数とともに若干増加する傾向が見られるだけである。この理由は0.55% C炭素鋼では降伏点あまり明瞭でなく、ひずみ硬化の度合が大きくて軟化する余地がなく、供試材料による差と考えざるを得ない。

(b) 応力二段のとき

第70図および第71図に0.28% C炭素鋼の応力二段のときの塑性ひずみ振幅の繰返し数に伴う変化を示した。ただし横軸の表示法は第59～61図の場合と同じ方法を採用した。図中Ns₁

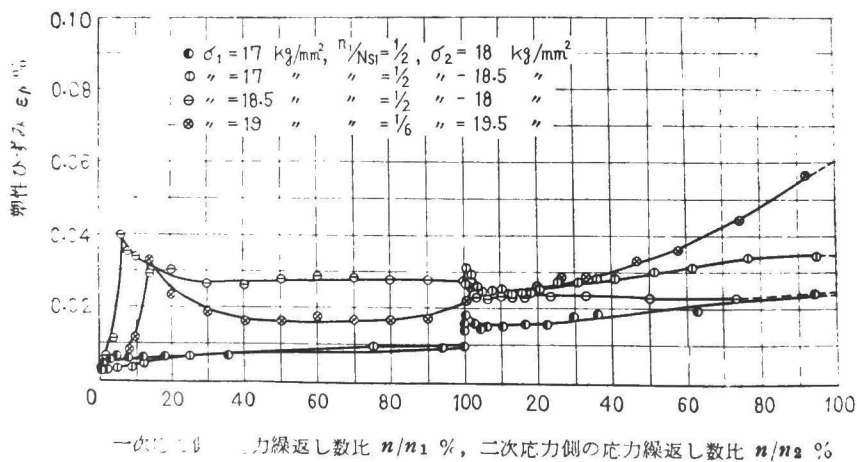


第70図 二段二重荷重下の $\epsilon_p - n/n_1$, $\epsilon_p - n/n_2$ 曲線 ($\sigma_1 = 18 \text{ kg/mm}^2$)

とあるのは応力一段の S-N 曲線から求めた一次応力 σ_1 に対する予想破断繰返し数である。また n_1 および n_2 はそれぞれ一次および二次応力での繰返し数である。

$\sigma_1 > \sigma_2$ の場合には二次応力において塑性ひずみ振幅 ϵ_{p2} は最初急激に減少し、後破断まで徐々に増加する傾向を示し、 $\sigma_1 < \sigma_2$ の場合には ϵ_{p2} は最初急激に増加し、その後は σ_2 の値が小さければ一時減少した後破断まで増加するが、 σ_2 の値が大きければ破断まで一様にかつかなり急激に増加している。破断時の塑性ひずみ振幅の大きさは応力一段のときよりかなり大きく、 $\sigma_1 < \sigma_2$ の場合のほうがその差は著しい。応力切換え時の ϵ_p の急激な変化は応力切換えによる過渡的な現象であるが、その後の ϵ_p の変化は応力一段の場合の変化とは若干異なっている。

0.28% C 炭素鋼の結果と比較して 0.55% C 炭素鋼の結果 (第 59~61 図) は趣が異なり、 $\sigma_1 > \sigma_2$ のときには二次応力において最初塑性ひずみ振幅 ϵ_{p2} は急激に減少し、後は一定値になるが、 $\sigma_1 < \sigma_2$ の場合においては σ_2 において最初急激に増加し、その後は破断まで徐々に減少す



第 71 図 二段二重荷重下の ϵ_p - n/n_1 , ϵ_p - n/n_2 曲線 ($\sigma_1=17, 18.5, 19 \text{ Kg/mm}^2$)

る傾向を示していた。

さてこれらの結果より次のことが言える。

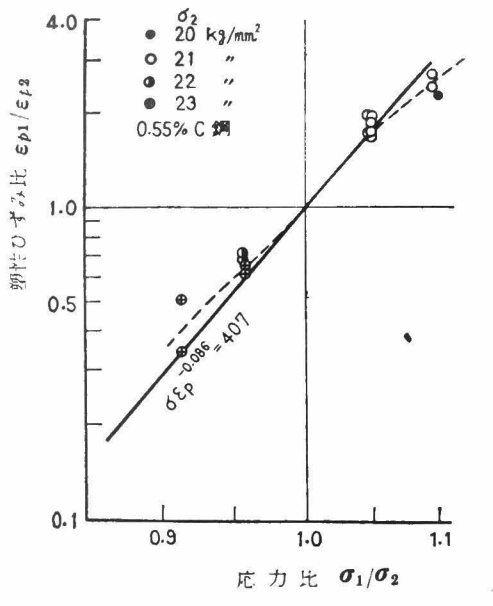
- (1) 二次応力に切換えたとき数%から10%ほどの繰返し数比内で塑性ひずみ振幅が過渡的に急激に変化している。
- (2) 二次応力において上述の過渡的な段階を過ぎても、二次応力での塑性ひずみ振幅 ϵ_{p2} の変化の挙動は、応力一段のときのそれとは異なった挙動を示している。特にこの傾向は $\sigma_1 < \sigma_2$ のとき、 σ_2 が大きい場合が著しいようであり、また破断までの繰返し数の少ない、いわゆる塑性疲れ⁽²²⁾⁽⁵³⁾の場合とは異なっているようである。

- (3) また二次応力での塑性ひずみ振幅の変化は一次応力の大きさにはかなり影響されるが、一次応力の繰返し数比 n_1/N_1 の値には実験の範囲内ではあまり影響を受けていないようである。

一次応力から二次応力に切換えたとき現われる塑性ひずみ振幅変化の過渡的現象について、これを定性的あるいは定量的に説明し、解析するには、今後さらに研究を行なわねばならないが、過渡的な状態の繰返し数比がかなり大きいこと、また0.28% C鋼と0.55% C炭素鋼において、過渡的な状態以後の ϵ_{p2} の変化の挙動はかなり異なるにも拘らず、この過渡的段階における ϵ_{p2} の変化の挙動が似ている点は興味ある問題である。

前節においても述べたように、疲れ試験に際してS-N線上的実験のばらつきに較べて塑性ひずみ振幅と破断までの繰返し数(ϵ_p -N曲線)との関係はあまりばらつきをもっていない。しかし実際上の問題として0.28% C炭素鋼のように塑性ひずみ振幅が全寿命中で大きく変動する場合には、定応力型の疲れ試験における塑性ひずみ振幅と破断までの繰返し数との関係といっても、それらを明瞭に定量的に関係づけることは困難である。また0.55% C炭素鋼の場合の応力振幅の高い場合に問題となるように、同一応力振幅であってもそのとき生ずる塑性ひずみ振幅は試験片によって大きな差がある。それに応じて二次応力での ϵ_{p2} が応力振幅といかなる関係にあるのかを論ずることは困難ではあるが、重要な問題であることは論をまたない。

さて第72図および第73図はこのような試験片個々の示す ϵ_p のばらつきを考慮して、縦軸に一次応力と二次応力での繰返し数比50%のところの塑性ひずみ振幅比 $\epsilon_{p1}/\epsilon_{p2}$ をとり、横軸に一次応力と二次応力の比 σ_1/σ_2 をとって二段二重複疲れ試験の応力とひずみの関係を示したものである。塑性ひずみ振幅の変化が0.28% C炭素鋼の場合に見られたように、繰返し数の増加



第72図 二段二重重複疲れ試験における塑性ひずみ振
幅一応力比の関係 (0.55% C鋼)

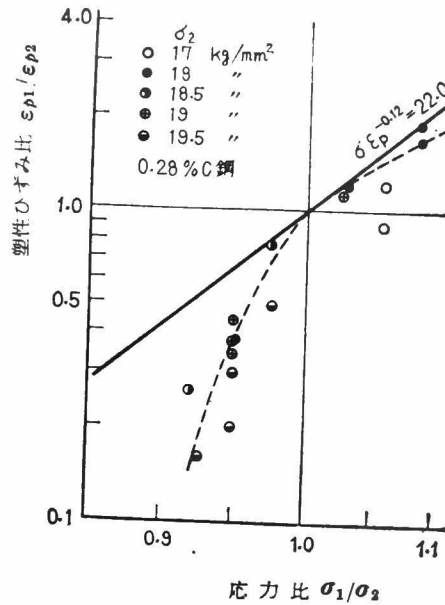
に伴って顕著に変化する際には、このようにして表わしても意味がないかもしれないが、二次応力における塑性ひずみを論ずる一つの目安になると考えられる。第72図および第73図において一次応力の繰返し数比 n_1/N_1 による差は顕著でないでその区別は省略した。両図において実線で示した直線は次のようにして求めた。応力一段の試験の際、S-N曲線および ϵ_p -N曲線 (ϵ_p は疲れ寿命50%のときの塑性ひずみ振幅) が

$$\sigma N^\alpha = C_1 \quad (12)$$

$$\epsilon_p N^\beta = C_2 \quad (13)$$

で示されるものとする、この二式からNを消去することにより

$$\sigma \epsilon_p^{\beta/\alpha} = \sigma_0 \epsilon_{p0}^{\beta/\alpha} = C \text{ (一定)} \quad (14)$$



第73図 二段二重重複疲れ試験における塑性ひずみ—応力
比の関係 (0.28% C鋼)

筋を得る。 σ_0 および ϵ_{p0} に任意の応力一段の実験点を代入して r および C を定めた。もちろんこの
 筋ようにできるのは(12)式および(13)式が成立するときだけである。0.28% C炭素鋼および0.55% C
 炭素鋼において両式が大略成立するので採用した。第72図および第73図における実線は(14)式を
 表わしている。第72図は0.55% C炭素鋼の場合であり、二次応力での塑性ひずみ振幅は(14)式で
 与えられる応力一段の場合の塑性ひずみ振幅より若干はずれる。すなわち $\sigma_1 > \sigma_2$ の場合には二次
 応力での ϵ_{p2} は応力一段のときの ϵ_p より大になり、また $\sigma_1 < \sigma_2$ の場合にはその逆になる傾向を
 示している。これは前節(第62図)において述べたとおりである。他方第73図は0.28% C炭
 素鋼の場合で、 $\sigma_1 > \sigma_2$ に対しては0.55% C炭素鋼と同じ傾向を示しているが、 $\sigma_1 < \sigma_2$ の場
 合には ϵ_{p2} は応力一段のときの同一応力での ϵ_p より大きくでており、 σ_1/σ_2 の比が小さくなる
 ほどその傾向は顕著である。このことは二次応力において σ_2 と σ_1 の差が大きいほど $\sigma_1 < \sigma_2$

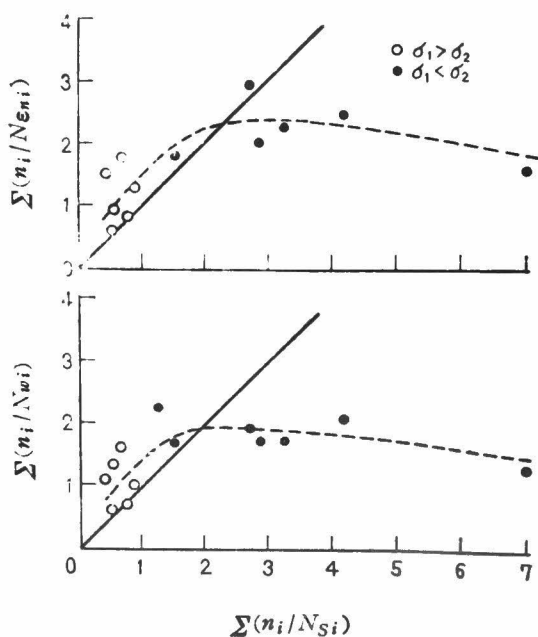
に対する ϵ_{p2} は繰返しとともに急増するという結果からである。かつ ϵ_{p2} が二次応力での繰返し数の50%のときの値であり、こゝではすでに第69図において ϵ_p が増加する範囲内にあることにもよる。

以上に説明したように、一次応力の繰返しを受けた材料の二次応力での疲れの進行に伴う塑性ひずみ振幅の挙動は、応力一段のときのそれとはまったく異なったものになり、明らかに一次応力の繰返しの影響を受けている。かつこの影響は二次応力を繰返しても消失することなく破断まで続いていることは明らかである。あるいは一次応力の影響は消えることがない、換言すれば一次応力によって材料の変形抵抗を変えてしまう、といってもよいだろう。

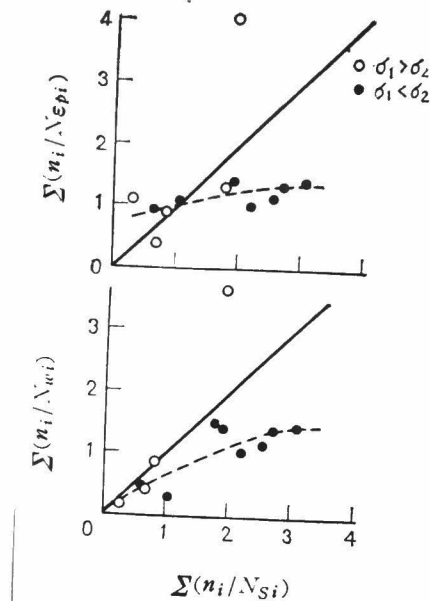
(c) S-N曲線、 ϵ_p -N曲線およびw-N曲線より求めた累積繰返し

数比の関係

前節で説明したように、S-N曲線より求めた二段二重重複疲れ試験における累積繰返し数比に比較して ϵ_p -N曲線およびw-N曲線より求めた累積繰返し数比のほうが1に近い値であった。こ



第74図 $\Sigma(n_i/N_{\epsilon p i}) - \Sigma(n_i/N_{S i})$ および $\Sigma(n_i/N_{w i}) - \Sigma(n_i/N_{S i})$ 曲線 (0.5% C鋼)



第75図 $\Sigma (n_i/N\epsilon_{pi}) - \Sigma (n_i/Ns_i)$ および $\Sigma (n_i/Nw_i) - \Sigma (n_i/Ns_i)$ 曲線
(0.28% C鋼)

の関係を0.55% C炭素鋼について第74図に、0.28% C炭素鋼について第75図に示した。各図において上半分は $\Sigma (n_i/N\epsilon_{pi}) - \Sigma (n_i/Ns_i)$ 曲線、下半分は $\Sigma (n_i/Nw_i) - \Sigma (n_i/Ns_i)$ 曲線である。ただし $N\epsilon_{pi}$ 、 Nw_i および Ns_i はそれぞれ一次および二次応力の繰返し数の50%における $\epsilon_{p, w}$ および応力に相当した予想破断までの繰返し数で、応力一段のときの ϵ_{p-N} 、 $w-N$ および $S-N$ 曲線から求めたものである。なお図中実線は $\Sigma (n_i/N\epsilon_{pi}) = \Sigma (n_i/Ns_i)$ および $\Sigma (n_i/Nw_i) = \Sigma (n_i/Ns_i)$ の場合であり、これは一次および二次応力での応力と塑性ひずみ振幅の関係が応力一段のときのそれと一致する場合を示す。

0.55% C炭素鋼および0.28% C炭素鋼においてそれぞれ若干の差異はあるが次の緒点が指適

されよう。

(1) $\sigma_1 > \sigma_2$ の場合には $\sum (n_i / N s_i)$ の値は1以下になり、 $\sigma_1 < \sigma_2$ の場合には1以上になる。

(2) $\sum (n_i / N s_i) < 1$ の場合には ϵ_p -N 曲線より求めた累積繰返し数比は S-N 曲線より求めたそれより大になる。

(3) $\sum (n_i / N s_i) > 1$ の場合には $\sum (n_i / N \epsilon_{pi})$ および $\sum (n_i / N w_i)$ の値は $\sum (n_i / N s_i)$ の値より小であり、特に 0.28% C 炭素鋼の場合に顕著である。

材料による定量的な差は ϵ_p の変化の挙動が材料によって大きく異なっていることからいたし方がないが、上記(2)および(3)の傾向より ϵ_p -N および w-N 曲線から求めた累積繰返し数比のほうが1に近い値になるのは当然である。

3・4・3 結 言

二種類の炭素鋼について引張圧縮の二段二重重複疲れ試験を行なって二次応力における塑性ひずみ振幅の変化の挙動、S-N 曲線、 ϵ_p -N 曲線および w-N 曲線より求めた累積繰返し数比の関係等について考察を行なった。0.28% C 炭素鋼の塑性ひずみ振幅の変化は応力一段のときにも応力二段のときにも、0.55% C 炭素鋼が示した挙動とはまったく異なった挙動を示したが、これは材料が軟鋼であり降伏点の踊り場が大きくかつ上降伏点と下降伏点の差が大きいというようなことに原因するものと思われる。

その他前節とほとんど同じ結果を得、二次応力における材料の性質は一次応力の影響を受けて処女材のそれとはまったく変化してしまうものと思われる。

3・5 平面曲げ疲れ試験における疲れき裂の進行について

3・5・1 試験方法

本節においては二次応力の繰返し中の疲れき裂の進行について論ずる。

使用した材料は 0.23% C の炭素鋼の板材である、その化学成分を第 12 表に機械的性質を第 13 表に示した。熱処理は 860℃ で 0.5 時間加熱後炉内冷却した。試験片の形状および寸法を第 76 図に示す。切欠の形状係数は $\alpha_k = 1.43^{(54)}$ である。

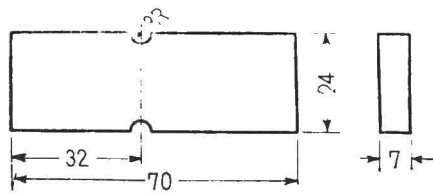
使用した試験機は Upton Lewis 繰返し平面曲げ疲れ試験機を用いた。繰返し速度は毎分

第12表 供試材の化学成分 (%)

C	Mn	Si	S	P
0.23	0.42	0.008	0.049	0.016

第13表 供試材の機械的性質

σ_{so} (Kg/mm^2)	σ_{su} (Kg/mm^2)	σ_B (Kg/mm^2)	σ_T (Kg/mm^2)	ϕ (%)	ψ (%)
30.4	29.4	44.4	78.0	35.0	50.4



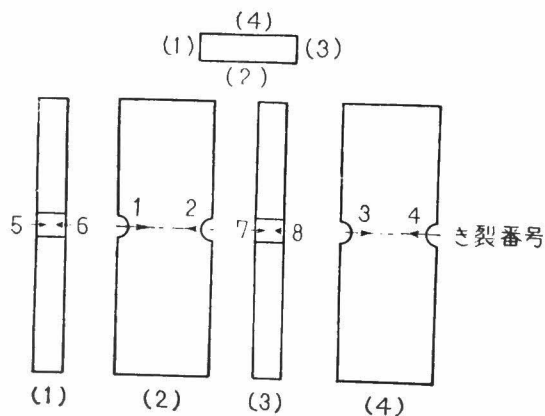
第76図 試験片形状および寸法

200回である。疲れき裂進行の測定法は次のとおりである。まず最初に供試材料の処女材料について定応力振幅で破断までの疲れ試験を行ない、繰返し途中で試験片を試験機からはずし試験片の表面を観察して疲れき裂の有無を観、応力一段の場合のS-N曲線および疲れき裂の長さとの繰返し数との関係を求めた。次に応力振幅として $12.5 Kg/mm^2$ と $18.0 Kg/mm^2$ を一次応力 σ_1 にと

り、この応力での疲れ寿命 N_1 の 0.2, 0.4 および 0.6 倍 の繰返し数 n_1 を与え、次に二次応力 σ_2 として $\sigma_1 = 12.5 \text{ Kg/mm}^2$ には $\sigma_2 = 18.0 \text{ Kg/mm}^2$ を、 $\sigma_1 = 18.0 \text{ Kg/mm}^2$ には $\sigma_2 = 12.5 \text{ Kg/mm}^2$ を与えて破断まで疲れ試験を行なった。二次応力繰返しの途中試験片を観察して疲れき裂の有無およびその長さを測定した。

き裂の観測には倍率 20 倍の目盛付き拡大鏡および読取り顕微鏡を使用し、巨視的疲れき裂を観測した。

切欠きを有する平面曲げ疲れ試験においてき裂の発生および進行は試験片の切欠き底 4 ケ所から 8 方向に始まる。また両振りの荷重を与えているので、ほぼ同じ繰返し数で切欠き底 4 隅からき裂が発生すると見なし得、測定の際き裂を見落とすということはなかった。8 ケ所のき裂測定ケ所を第 77 図に示す。実験の便宜上図示のように番号をつけた。No.1 と No.6, No.2 と No.7, No.3 と No.8 および No.4 と No.5 とは同一隅から発生するき裂である。き裂発生後のき裂の長さは試験片の周辺から矢印



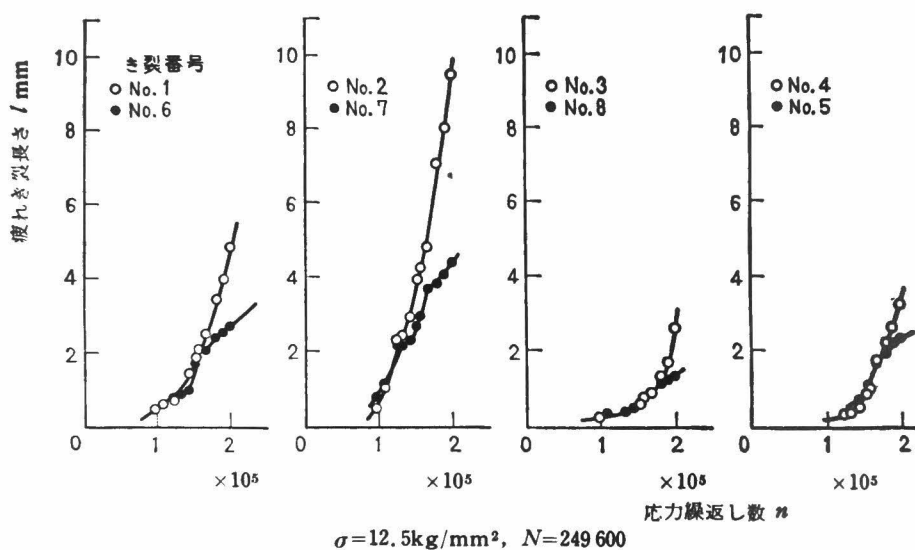
第 77 図 き裂発生および進行方向

の方向に測定した。

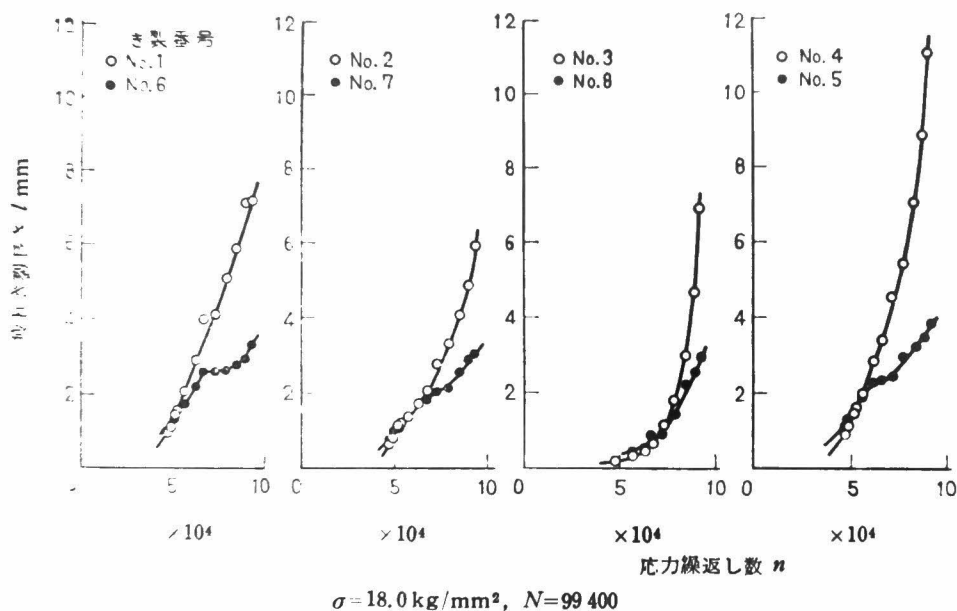
3・5・2 試験結果および考察

(a) 応力一段のとき

第78図および第79図に応力一段の場合の疲れき裂進行の二例を挙げた。両図より明らかなように疲れき裂の進行は必ずしも滑らかには生じておらず、両対数方眼紙にプロットしても直線にはなっていない。拡大鏡で読みとれる疲れき裂は試験片の切欠底の4隅では同時に発見されたが、試験片の厚み方向（図中の黒点、き裂番号5，6，7，8）のき裂のほうが最初長いようである。しかし試験片の寸法の関係から途中で横方向の長さが大になっている。また試験片の破面はいずれもひし形になっており、疲れき裂が4隅から発生し、中心に向かって平行に進行したものと考えられる。



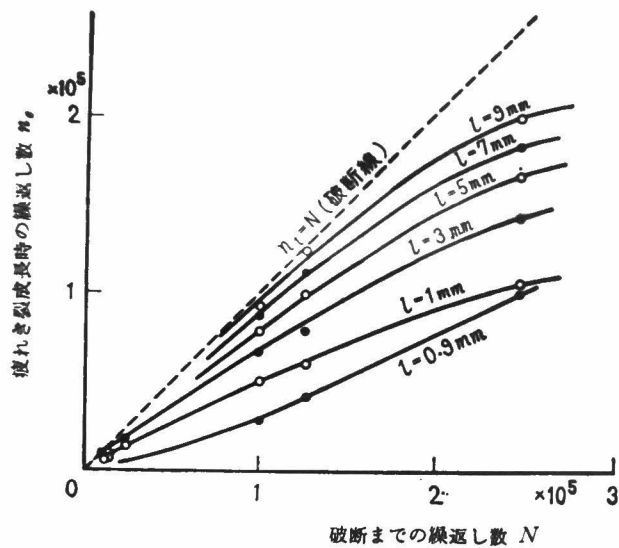
第78図 応力一段のときの疲れき裂進行の一例



第79図 応力一段のときの疲れき裂進行の一例

各試験片において、破断直前において最も長い疲れき裂を選び、横軸に破断時の繰返し数 N 、縦軸に疲れき裂の長さが ℓ になったときの繰返し数 n_e をとり、パラメータに ℓ をとって示したものが第80図である。この図をもとにして破断までの繰返し数 N をパラメータにして、縦軸に疲れき裂長さ ℓ 、横軸に繰返し数比 n_e/N をとって図示したものが第81図である。この図より次の3点が明らかである。

- (1) $\ell < 1 \text{ mm}$ のときには疲れき裂進行速度は非常におそいが、 $\ell > 1 \text{ mm}$ になるとほぼ指数関数的に疲れき裂は進行する。ただし第81図では第78図、第79図に示したき裂進行の凹凸は省略されていることは注意しなければならない。また第80図および第81図に示したものは横方向のき裂のみをとっており、厚み方向のき裂は第78図および第79図より明らかなように、指数関



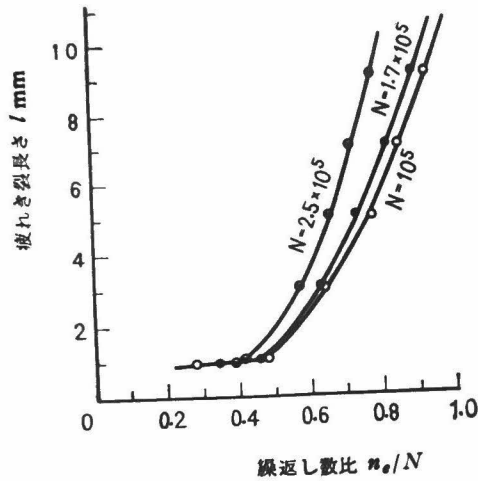
第80図 応力一段のときの n_e-N 曲線

数的に進行していない。

- (2) 疲れき裂が発生する繰返し数は非常に早いものと考えられ、微小き裂は寿命の10%内外で発生しているものと考えられる。
- (3) 疲れ寿命の長いものほど、換言すれば応力振幅の小さいものほど、少ない繰返し数比で大きな疲れき裂に達している。これは第78図より明らかなように疲れき裂が4隅より一様に進行せず最も長い疲れき裂は他のき裂よりとびぬけて長くなっておるためである。

第82図は繰返し応力と疲れき裂が1mmになったときの繰返し数比 n_e/N の関係を示したものである。応力が低いほど n_e/N の値は小さくなっており上記(3)と一致している。

(b) 応力二段のとき

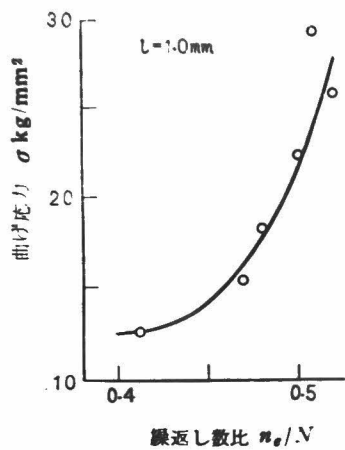


第81図 応力一段のときの $l - n_e/N$ 曲線

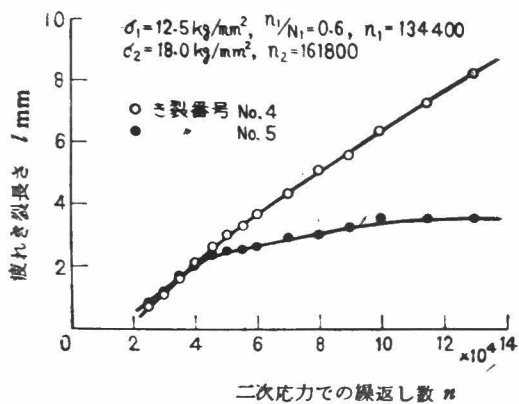
応力が二段のときの二次応力での疲れき裂の進行の二例を第83図および第84図に示した。第83図は $\sigma_1 < \sigma_2$ ，第84図は $\sigma_1 > \sigma_2$ の例で，それぞれの試験条件は図に示したとおりである。両図にはき裂番号 n_4 と n_5 の結果しか示していないが，他の切欠底のき裂進行の挙動も両図に示したものとほぼ同様である。応力一段の場合と同様に切欠底の厚み方向のき裂のほうが最初長くなっているが，厚み方向のき裂長さが2.5mmくらいになると横方向のき裂のほうが長くなり，特にこの辺りから厚み方向のき裂の進行は緩慢になっている。

n_1/N_1 の値が0.4および0.6の場合には二次応力に切換えたとき，すでに疲れき裂が現われていたが，これはほとんど進行せず，図に示したように二次応力のある程度繰返した後に改めて新しいき裂のごとく進行する傾向が見られた。

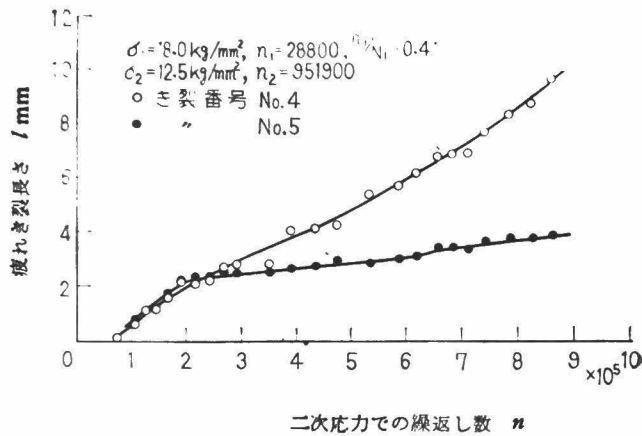
第85図および第86図は縦軸に最大の疲れき裂長さをとり，横軸に二次応力における繰返し数比 n_e/n_2 をとって図示したものである。第85図は $\sigma_1 (12.5 \text{ Kg/mm}^2) < \sigma_2 (18.0 \text{ Kg/mm}^2)$ の場合，第86図は $\sigma_1 (18.0 \text{ Kg/mm}^2) > \sigma_2 (12.5 \text{ Kg/mm}^2)$ の場合であり，両図とも一次応力繰



第82図 繰返し応力-繰返し数比曲線
($l=1.0\text{mm}$ のとき)



第83図 二次応力での疲れき裂進行の一例
($\sigma_1 < \sigma_2$ の場合)

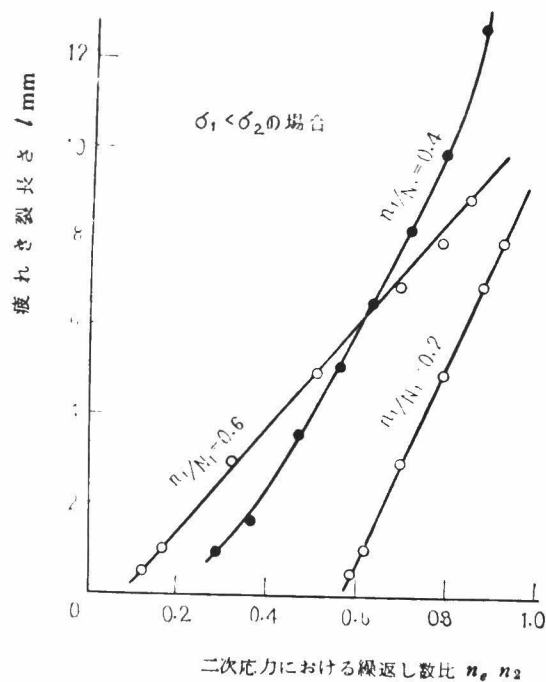


第 8 4 図 二次応力での疲れき裂進行の一例 ($\sigma_1 > \sigma_2$ の場合)

返し数比 n_1/N_1 をパラメータに選んである。応力二段のときの二次応力における疲れき裂の進行の特徴を挙げれば次のようになる。

- (1) 応力一段のときは第 8 1 図に示したように指数関数的に疲れき裂は進行しているが、応力二段の場合には、 $\sigma_1 < \sigma_2$ に対してはほぼ直線的に、 $\sigma_1 > \sigma_2$ に対しては第 8 6 図に示したように疲れき裂の進行は前 2 者とは異なった複雑な挙動を示している。
- (2) $\sigma_1 < \sigma_2$ の場合には疲れき裂長さ l が 1 mm になる二次応力での繰返し数比は、一次応力での繰返し数比 n_1/N_1 が小さいほど大きくなっているが、 $\sigma_1 > \sigma_2$ の場合には n_1/N_1 の大きさによる差はほとんどみられず、 $n_e/n_2 = 0.1 \sim 0.2$ の間に $l = 1 \text{ mm}$ になっている。
- (3) n_1/N_1 の値による疲れき裂の進行の挙動には大きな差は認められないようである。

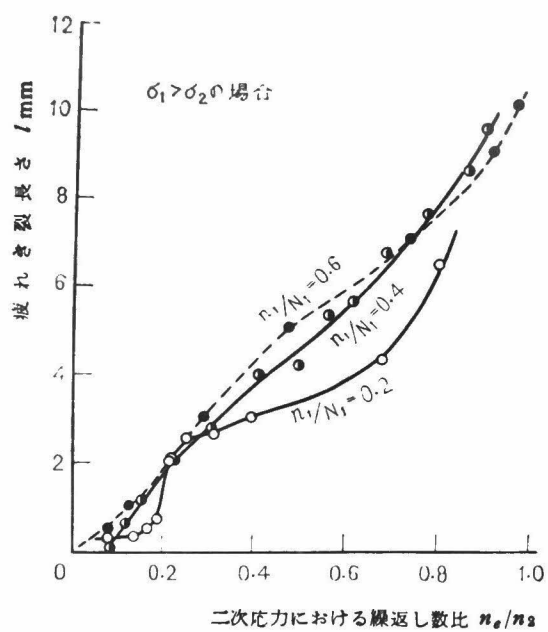
一次応力の繰返しを受けた材料の、二次応力での疲れき裂進行が非常に興味ある挙動を示していることは上に述べたとおりである。応力一段のときの疲れき裂の進行と異なった挙動を示すことは、前節までに述べた塑性ひずみ振幅の挙動の場合とまったく同様であり、一次応力の繰返しを受けることによって材料が大きな影響を受け、この影響は二次応力での繰返しを受けても消失



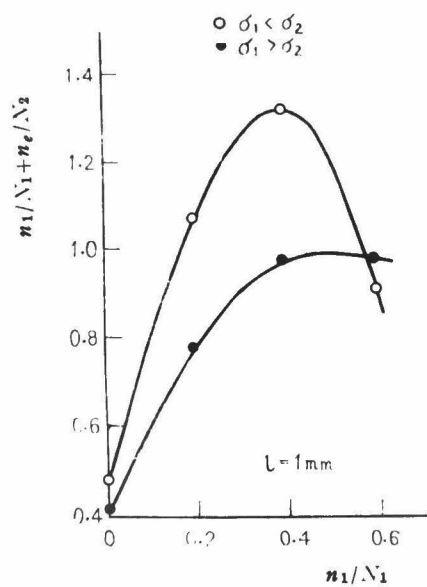
第85図 二次応力での $\ell - n_e/n_2$ 曲線 ($\sigma_1 < \sigma_2$ の場合)

せず、破断まで残っているといわねばならぬようである。

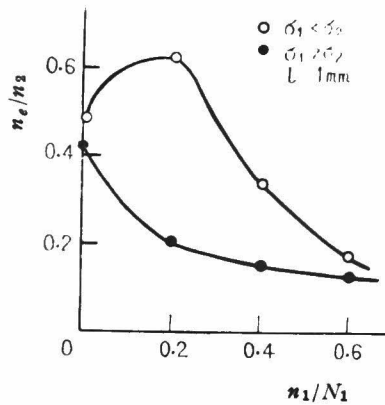
次に二段二重重複疲れ試験における一次応力繰返し数比と疲れき裂長さ ℓ が 1 mm になったときの繰返し数との関係を検討してみることにする。第87図は縦軸に $n_1/N_1 + n_e/N_2$ (n_1 は一次応力繰返し数, n_e はき裂長さが 1 mm になったときの二次応力での繰返し数, N_1, N_2 はそれぞれ一次および二次応力での応力一段のときの予想破断までの繰返し数) を、横軸に n_1/N_1 をとって図示したものである。疲れ寿命が非常に大きくなっているために縦軸の値が1よりも大になっているものもあるが、 $n_1/N_1 + n_e/N_2$ の値は $\sigma_1 < \sigma_2$ のほうが $\sigma_1 > \sigma_2$ の場合よりも大になっている。第88図は縦軸を二次応力の繰返し数 n_2 に対する ℓ が 1 mm になったときの繰返し数 n_e の比に改



第 8 6 図 二次応力における $l-n_e/n_1$ 曲線 ($\sigma_1 > \sigma_2$ の場合)



第 8 7 図 $(n_1/N_1 + n_e/N_2) - n_1/N_1$ 曲線



第 8 8 図 $n_e/n_2 - n_1/N_1$ 線図

めて書き直したものである。この場合にも明らかに n_e/n_2 の値は $\sigma_1 < \sigma_2$ のほうが $\sigma_1 > \sigma_2$ の場合よりも大きくなっている。また n_1/N_1 の値が大きくなるにしたがい n_e/n_2 の値は小さくなる。このことは一次応力の繰返しによって疲れき裂が大きくなり、二次応力に切替えたとき疲れき裂の進行が停滞する期間が短くなっていくことを示す。また第 8 7 図および第 8 8 図においていずれも縦軸の値が $\sigma_1 < \sigma_2$ の場合のほうが大きいということは、この現象が $\sigma_1 < \sigma_2$ の場合に累積繰返し数比を大きくする傾向が顕著であるという事実（たとえば第 7 4 図、第 7 5 図）を説明していると考えられる。

3・5・3 結 言

本節においては 0.23% C 炭素鋼を用いて二段二重重複平面曲げ疲れ試験を行ない、疲れの進行に伴って疲れき裂が如何に進行するか、また一次応力の繰返しを受けた試験片ではこの疲れき裂の進行はいかに影響されるかについて論じた。

応力一段の場合には疲れき裂の進行はほぼ指数関数的であるが、応力二段の場合には、 $\sigma_1 < \sigma_2$ に対してはほぼ直線的に、 $\sigma_1 > \sigma_2$ に対しては階段状に複雑に進行していく。

また応力一段の場合疲れき裂の長さが 1mm になる繰返し数は $n_e/N=0.4\sim 0.5$ の間に入るが、負荷応力が低いほど n_e/N の値は小さくなる。これに反し一次応力で若干の疲れき裂が存在していても二次応力に切換えた後暫くの間は疲れき裂は進行せずその後まったく新しいき裂のように進行する。

応力切換えの際に塑性ひずみ振幅の場合に現われた過渡的現象は見られず、その代り応力一段の場合とまったく異なった挙動を示していることが明らかである。

3・6 結 言

本章においては疲れ被害曲線を応力と繰返し数のみで考える方法をとらず、疲れの進行に伴って材料が示す巨視的変形挙動を媒介として疲れ被害曲線を考えるために二段二重重複疲れ試験を行ない考察してきた。その結果、大きな特徴として得られたことは

- (1) 応力を一次から二次応力へと切換えた際、二次応力の繰返し中ほど初期の10%くらいの繰返し数内で過渡的な変形現象が現われること、換言すれば応力の大きさが変形しても新しい応力に順応した巨視的変形挙動を示す前に一次応力の影響を受けた過渡的変形挙動を示している。
- (2) 二次応力における現象が一次応力の影響を受けて処女材の変形挙動とはまったく異なったものになる。

特に後者では一次応力の影響は二次応力の繰返し中まったく消失しないようであるから、処女材の挙動とはまったく別のものであると考えたほうがよいようである。

さて従来の疲れ被害の算出の方法では単に一次応力の大きさおよび繰返し数比が二次応力での寿命にいかなる影響を及ぼすかという点だけを考慮しておった。しかし第3・3節および第3・4節に示したように材料の種類によって塑性ひずみ振幅の変化の挙動は異なってくる。したがって繰返し数比、応力の大きさのみによって疲れ被害度を求める方法では普偏性のある法則性を見い出すことができるであろうかという疑問が起ってくる。また従来の疲れ被害曲線を求める方法では同じ一次応力の条件に対して二次応力の大きさによって疲れ被害度が零または負になるという結果が生じてくる。しかし二次応力の大きさによって疲れ被害度が正にも、零にもまた負にもなるという考え方は便利ではあっても、決して正しい見方であるとは思われない。上述の結果の(2)によれば、一次応力の繰返しを受けることによって、材料は必ず被害を受けるのであり、たゞ二次応力での変形抵

抗、機械的性質、疲れ強さ等が処女材のそれらとは異なったものになってしまうのである。それらについては第62, 72, 73, 81, 83, および84図において説明したとおりである。

それでは疲れ被害度を求める場合何を基準に考えたらよいであろうか。一般に疲れ強さに影響を及ぼすすべての因子、すなわち、材料の化学成分、結晶粒度、組織、熱処理、表面処理、試験温度、雰囲気、試験機の種類、試験速度、応力条件（引張圧縮、曲げ、ねじり等）等の因子が疲れ被害度に影響を及ぼしていると考えられる。したがって唯一種類の材料について実験を行ない、疲れ寿命がどうなるかといった従来の疲れ被害を求める方法では、その材料と試験条件での疲れ被害しか求められないであろう。たとえば結晶粒度が異なり金属学的組織が異なれば、き裂の進行の仕方は当然異なってくるであろう。かつ一次応力の影響を受けて二次応力でのき裂の進行の度合も変化することは今までの実験結果から想像されることである。したがって同一材料であっても疲れ被害曲線は当然異なってくる。

疲れ被害曲線を求める場合、我々がとるべき方法は疲れ強さに影響を及ぼす各因子について地道なかつ系統的な研究方法であると思う。

次に二段二重重複疲れ試験で得られた疲れ被害度の結果・概念をそっくりそのまま多段多重、ランダム荷重に対する疲れ被害の進行に対して適用できるとは言えない。何故ならば、すでに述べたように一次の応力段階から他の応力段階に応力の大きさを变化したとき、過渡的現象が現われる。しかるにこの過渡的現象が現われる繰返し数は、多段多重やランダム荷重における一つの応力段階の繰返し数よりも大きいものと思われる。したがって二段二重重複荷重の疲れ試験の結果を多段多重あるいはランダム荷重の疲れ強さの推定に、あるいはプログラム荷重の結果を実働荷重の疲れ強さの推定に転用するために、今日の段階において解決すべき問題は次の諸点になるであろう。

- (1) 破断までの繰返し数に対応する巨視的変形挙動を見い出すこと。応力履歴が存在する場合はこの応力履歴と変形挙動の一対一対応を見い出すこと。そのためには材料毎の比較ではなしに、化学成分による比較、結晶粒による比較、熱処理による比較等、疲れ強さに影響を及ぼす諸因子毎の巨視的変形挙動と疲れ強さの比較をすべきである。
- (2) 過渡的な変形挙動と機械的諸性質の比較、また過渡的挙動が生ずる冶金的な原因の研究をすることが必要である。これを明らかにすることによって二段二重重複荷重下の試験結果を多段多重あるいはランダム荷重下の疲れ強さ、疲れ寿命の推定に転用することが可能になると考えられる。

第2部 実働荷重下の疲れ強さ

第4章 応力波形の疲れ強さに及ぼす影響

4・1 緒言

実働荷重とは実際に機械部品や構造物に作用している荷重を意味する。機械部品や構造物に作用している荷重がそれらが破断に到るまで一定振幅の荷重の繰返しであることはほとんど稀である。たとえ常に一定荷重で負荷されている部品でも時には機械の点検のために運転を中止し、その前後に負荷応力の変動が加わることがあろう。このような簡単な場合には疲れ寿命の算出は容易であるが、車輛、飛行機、工作機械、建造物等においては常に負荷応力の大きさが変動し、全寿命を通じてそれらに作用する荷重の大きさを経済的に評価できないのが現状であるといつて差支えない。

そのために一定荷重とは異なった二段二重、二段多重、多段多重重複荷重による疲れ試験、変動応力、プログラム荷重、ランダム荷重等による疲れ試験が行なわれ実働荷重に対する疲れ強さを求めようとされている。

実働荷重での疲れ試験の方法としては

- (1) 実働荷重を系統的に把握しようとするプログラム疲れ試験、
- (2) 応力波形が疲れ強さに及ぼす影響を研究する方法、
- (3) 第1部で述べたように応力履歴をもつ材料が示す巨視的あるいは微視的な材料の変形挙動を明らかにして応力履歴の影響を研究する方法、

等到大別できよう。上述の3つの方法によって盛んに金属材料の実働荷重下の疲れの法則性を見出すために研究されているにも拘らず、今日ランダム荷重による疲れ試験が行なわれていることは実働荷重による疲れの挙動が大変複雑であり簡単に解決されないことを意味するものである。

(3)の方法についてはすでに述べた通りであるが、今日の段階では未だ系統的に研究されておらず材料毎の疲れ被害曲線を求めているに過ぎない。次に(1)の方法による実験については次章において述べるが、この方法においては実働荷重分布を分析してプログラム荷重を作り実験されている。

しかし実験結果のまとめ方とか応用の際には、直線被害曲線からのずれで設計基準を求めているのが実情で、何故ずれるのか、あるいは一般的な法則性の見いだされない理由の追求といった研究にまでは今日の所未だ到っていない。(1)の方法とともに実働荷重による疲れの研究において忘れてならぬことは(2)の応力波形が疲れ強さに及ぼす影響の研究である。

多段多重重複疲れ試験、プログラム荷重疲れ試験あるいは変動荷重による疲れ試験においても繰返される応力波形は正弦波であって、たゞ応力振幅のみが変化する。回転体を除く機械部品のほとんどはその負荷される荷重が正弦波でないことがその大きな特徴である。しかし、疲れ強さは波形よりも振幅の大きさに影響されるといわれ、波形そのものが疲れ強さに及ぼす影響に関する研究はほとんど行なわれていないのが現状である。微小振動が正弦波に加わって作用した場合、疲れ寿命が変化するという結果が報告されているが、もしこの微小振動の振幅を大きくしかつ周期を短かくしていけば正弦波とは異なった種々の応力波形を得ることができる。このような応力波形の疲れ強さに及ぼす影響についても充分研究する必要がある。

本章においてはこのような考えに基いて、応力波形を二、三変えてこれらの波形と疲れ強さの関係について研究した結果を述べる。一般に応力波形より振幅の方が疲れ強さに大きな影響を及ぼすということは、三角波や四角波、梯形波が影響を及ぼさないということを意味するものと考えられる。何故なら超高速の試験速度でなければ試験速度が疲れ強さに及ぼす影響は無視されるからである。また1サイクル中に応力のピークが2個あるといった波形は影響を及ぼすものと考えられる。何故ならば、このような波形は二段多重での一段の応力繰返し数を1まで小さくしたようなものであるからである。そのような意味で本章で扱う応力波形としてはピーク波、双子波および複調和応力波の三種類とした。これらの波形については後で詳しく述べるが、ピーク波とは応力波形のピークの所が平になったもの、双子波とはラグダのコブのように1サイクルにピークが2つある波形、そして複調和応力波とは、2個の正弦波を同時に組み合わせた複調和波形である。

本章においてはまず最初に複調和応力波を負荷するために試作した複調和繰返し応力疲れ試験機について述べ、次にピーク波応力、双子波応力の疲れ寿命に及ぼす影響、およびそれらについて統計的に研究した結果および応力波形によって応力振幅の疲れの進行に伴って変化する様子の相違について述べる。かつ本章の最後において複調和応力による疲れ試験の結果について考察する。

4・2 試作複調和繰返し応力・疲れ試験機

上述のごとく、こゝにいう複調和繰返し応力とは、1サイクル間にいくつかの極大値および極小値をもつ繰返し応力を指すものであり、このような応力波形は周期・振幅および位相の異なるいくつかの正弦波を同時に試験片に与えることによって得られる。従来、このような応力波形の疲れ強さに及ぼす影響に関しては数種の報告を見るに過ぎない。また応力波形の発生方法としては、実験しようとする応力波形をもったカムによる方法、油圧による方法、遠心力による方法、その他の方法が用いられている。

本節に述べる複調和繰返し応力疲れ試験機は応力波形の発生から応力の検出まですべて機械的に行なわれるものである。応力波形発生の原理は周期および位相の異なる2組の偏心重錘を回転させることによって生ずる遠心力を試験片に与えることによるものである。以下本試験機の詳細について述べることにする。

4・2・1 試験機構造概略

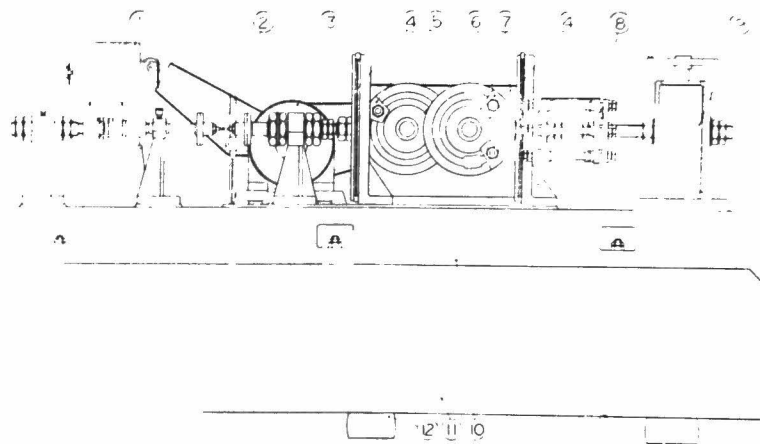
本試験機は駆動部、荷重発生部、平均荷重部、試験片および応力波形検出部より成っている。第89図に試作した複調和繰返し応力疲れ試験機の外観を第90図に試験機の側面図を第91図に試



第89図 複調和繰返し応力疲れ試験機概観図

験機の機構原理図を示した。第90図は第89図の写真と反対側から見たものである。本試験機の構造の大略を第90図および第91図によって記せば次の通りである。なお第90図および第91図の部品番号は両図に共通したものである。

駆動用電動機(3)より歯車箱(7)に入った入力は変速歯車(14)により2つの異なった回転速度で歯車軸(15)に伝わる。軸(15)はばね継手(16)を経て偏心重錘(5)および(6)を回転する。さて偏心重錘の回転によって生じた遠心力の内試験片軸と直角方向の分力は荷重棒(19)の両端に取り付けた2ヶの案内用板ばね(4)によって受けられ、試験片軸方向の分力のみが試験片(2)に伝達される。



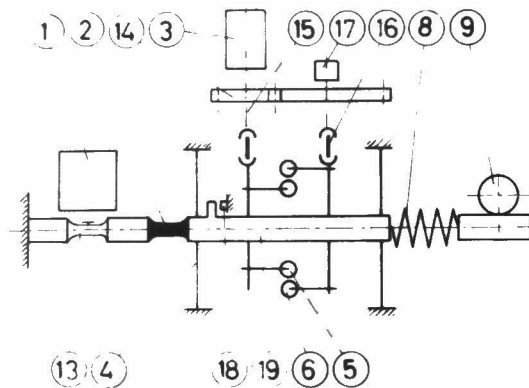
- | | |
|-------------|------------|
| 1 入力波形測定箱 | 7 歯車箱 |
| 2 試験片 | 8 平均荷重用ばね |
| 3 駆動用モータ | 9 平均荷重負荷装置 |
| 4 案内用板ばね | 10 機床 |
| 5 偏心重錘(高速側) | 11 支持台 |
| 6 偏心重錘(低速側) | 12 調整台 |

第90図 試験機側面図

試験片(2)に作用する荷重は荷重検出棒(13)によって弾性ひずみとして取り出され、これを応力波形測定箱(1)によって応力波形として検出される。試験片(2)に与える平均荷重は平均荷重負荷装置(9)によって平均荷重ばね(8)のたわみで与えられる。荷重繰返し数は $1/100$ に減速して6桁の積算回転計(17)によって指示される。また試験片(2)が破断したとき、あるいは試験片が3mmの疲れ変形を起したときには自動停止装置(18)が働き電動機が停止する。

次に本試験機の各部の構造および機能を詳述しよう。

4・2・2 荷重発生部および駆動部



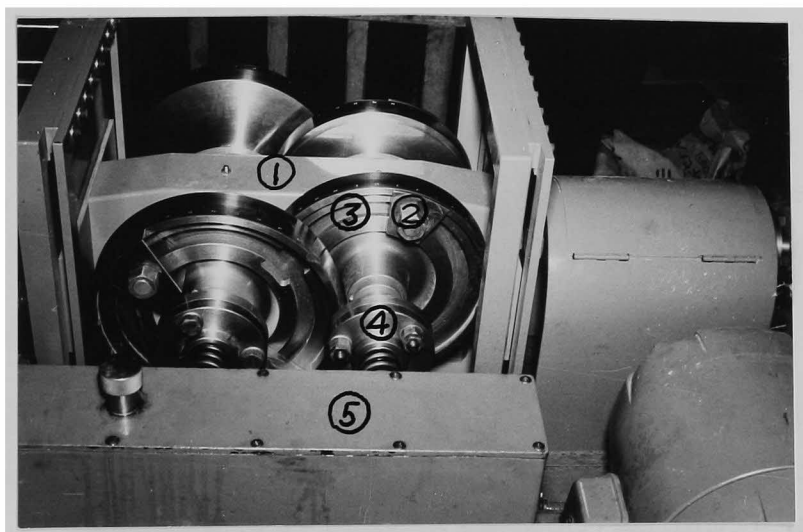
- | | |
|------------|-----------|
| 1 応力波形測定箱 | 13 荷重検出棒 |
| 2 試験片 | 14 変速歯車 |
| 3 駆動用モータ | 15 歯車軸 |
| 4 板はね | 16 はね継手 |
| 5 6 偏心重錘 | 17 積算回転計 |
| 8 平均荷重用板ばね | 18 自動停止装置 |
| 9 平均荷重負荷装置 | 19 荷重棒 |

第91図 試験機機構概略図

第92図に複調和繰返し応力発生装置を示した。歯車箱(5)よりばね継手(4)を経て偏心重錘(2)のついた円板(3)を回転することによって遠心力が発生し、この遠心力の試験片軸方向の分力を試験片に与えるわけである。疲れ変形あるいは平均荷重負荷時の荷重棒(1)の試験片軸方向の移動を容易にし、かつ騒音防止の目的で偏心円板と歯車軸との接続にばね継手(4)を用いた。

第92図に見えるように偏心重錘を取り付ける回転円板は2枚を1組とし、荷重棒(1)の左右で荷重が釣り合うようにした。それぞれの円板には一定重量の2ケの重錘がボルトで固定されている。これらの重錘は円板の一定半径上を移動できるようになっており、2ケの重錘の中心角を相対的に変えることにより任意の遠心力を発生させ得る。今1ケの重錘の重量を w 、各重錘の回転中心になす中心角を θ とすると、1組の荷重軸によって発生する遠心力 P_c は

$$P_c = \frac{4w}{g} \cos \frac{\theta}{2} \cdot r \cdot \left(\frac{2\pi f}{60} \right)^2 \quad (15)$$



第92図 荷重発生装置

で与えられる。ただし g は重力の加速度， r は重錘重心の回転半径，および f は荷重軸の毎分の回転数である。 w ， g ， r および f は一つの荷重系に対しては一定の値であるから，結局偏心重錘によって発生する遠心力は

$$P_c = A \cos \frac{\theta}{2} \quad (16)$$

となり重錘の相対角度 θ のみの関数で与えられる。

このようにして発生した遠心力の内，試験片軸に直角方向の分力は案内用板ばね（第92図の①）で受け止められて試験片には作用せず，試験片軸方向の分力のみが試験片に伝達される。本試験機のように応力波形を問題にする際には，発生した荷重が摩擦等による減衰を受けることなく，試験片に伝達されることが一番望ましい。本試験機においては上記の案内用板ばねは，発生した荷重を試験片軸方向に導いているだけで，摩擦による減衰は生じなく，かつ試験片に曲げの加わる恐れはまったくない。ただしこの案内用板ばねの試験片軸方向のたわみによる拘束力は 3mm のばねのたわみに対し約 20Kg になるよう設計した。したがって疲れ試験中の試験片のひずみ振幅が微小であれば，この拘束力はほとんど無視できる。

このようにして試験片には [時刻 t (秒)において]

$$P_t = A \cos \frac{\theta}{2} \cdot \sin \left(\frac{2\pi f}{60} t \right) \quad (17)$$

で表わされる繰返し荷重が与えられる。式(17)は一組の荷重系によって得られる荷重であるが，回転速度の異なる2組の荷重系があるから試験片には

$$P_t = A \cos \frac{\theta_1}{2} \cdot \sin \left(\frac{2\pi f_1}{60} t \right) + B \cos \frac{\theta_2}{2} \cdot \sin \left(\frac{2\pi f_2}{60} t + \alpha \right) \quad (18)$$

なる荷重が与えられる。ただし A および B は式(15)より求められる定数， f_1 ， f_2 は各荷重系の1分間の回転数， θ_1 および θ_2 は各荷重系の重錘のなす中心角，および α は2組の荷重系の初期位相差であり， α の値はばね継手の位置と変えることによって任意の値が得られる。

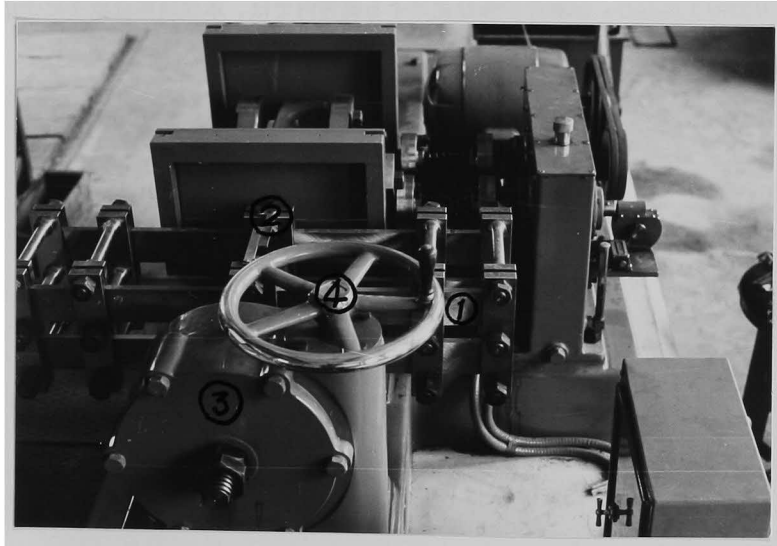
歯車箱の中の歯数比を変えることによって f_1 と f_2 の比を任意に定めることができる。試作した試験機では $f_1 : f_2 = 1 : 2$ とした。また回転円板の非対称性のため試作試験機では(16)式が

$$\begin{array}{ll}
 \text{高速側} & P_c = 0.1001 + 4.1178 \cos \left(\frac{\theta}{2} \right) \\
 \text{低速側} & P_c = 1.163 \cos \left(\frac{\theta}{2} \right)
 \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} P_c = 0.1001 + 4.1178 \cos \left(\frac{\theta}{2} \right) \\ P_c = 1.163 \cos \left(\frac{\theta}{2} \right) \end{array}} \right\} \quad (19)$$

となった。ただし荷重の単位はトンである。

4・2・3 平均荷重部

第93図に平均荷重負荷装置を示した。写真に見えるハンドル(4)を動かし歯車箱(3)を介して平均荷重用板ばね(1)を前後にたわませ、このばねの弾性たわみで試験片に平均荷重を与える。平均荷重の大きさは板ばねの弾性たわみを平均荷重読み取りスケール(2)によって読むかあるいは後述の応力波形測定箱内の光点の移動量で読み取る。板ばねのたわみ量 δ (mm)と試験片に与えられる



第93図 平均荷重装置

荷重 P_m (kg) との関係は

$$\left. \begin{array}{l} \text{引張荷重に対して } P_m = 178.9\delta \\ \text{圧縮荷重に対して } P_m = 171.4\delta \end{array} \right\} \quad (20)$$

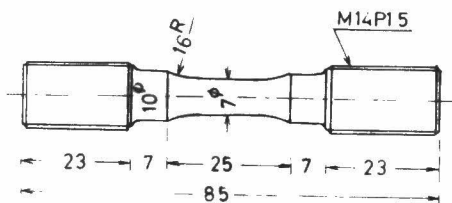
である。平均荷重読み取りスケールには10分の1mmまで読めるよう副尺が付いているので平均荷重は18kg単位で与え得る。

4・2・4 試験片および荷重検出部

本試験機は引張圧縮用として設計・試作したが、試験片のチャックを取り替えることにより実物試験、曲げ・ねじり疲れ試験を行なうことも可能である。第94図に試作試験機に使用した標準型の引張・圧縮疲れ試験片の形状および寸法を示した。試験片の平行部分の長さを25mmと考え、試験片の弾性係数を $E = 21,000 \text{ kg/mm}^2$ にとると、荷重 P_s (kg) と試験片の伸び δ_s (mm) との関係は弾性範囲内で

$$P_s = 3.229 \times 10^4 \delta \quad (21)$$

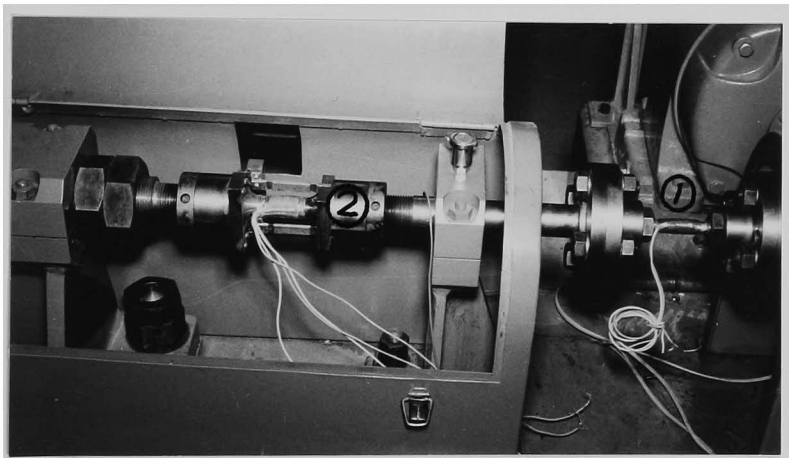
となる。式(20)と式(21)を比較すれば、平均荷重用板ばねのばね係数が、試験片のばね係数の $\frac{1}{200}$ になり、試験片が弾性変形する範囲内では、本試験機は完全に定応力型の疲れ試験機と考えて差支えない。



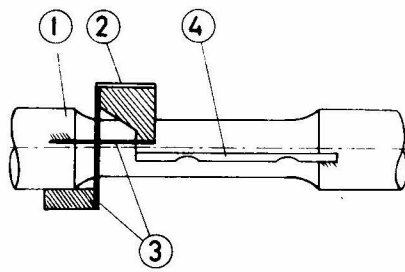
第94図 試験片形状および寸法

試験片と直列に荷重検出棒を取り付けて荷重を検出する。その配置を第95図に示した。荷重検出棒(2)には第96図に示すような鏡装置を取り付け荷重に比例した検出棒の弾性変形を鏡の回転角として取り出す。第97図に応力測定箱と、それを駆動する装置の外観を示した。第98図は応力波形測定箱の内部の光学系を示したものである。光源ランプ(1)を出た光はスリット(2)を経てレンズ(3)により絞られ、反射鏡(4)(5)(6)および(7)を経てスクリーン(8)に焦点を結ぶ。鏡(4)および(6)は応力測定箱に固定された反射鏡であり、鏡(5)は荷重検出棒に取り付けられた反射鏡(第96図の(2))である。鏡(7)は第97図に示したように直接駆動用電動機から駆動されて毎分30回で回転する八面鏡である。この八面鏡は試験機の荷重繰返し速度と同調されているので荷重に比例した荷重検出棒の伸びが、第98図の右端に示したごとく、スクリーン上に止った像として荷重一時間曲線となって描き出される。

回転八面鏡の回転は第97図のクラッチ(3)を切ることにより、止めることができる。この場合

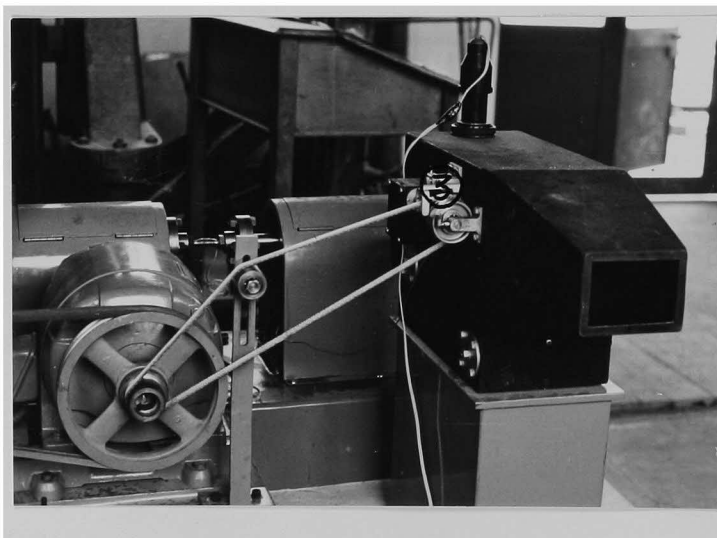


第95図 試験片および荷重検出部

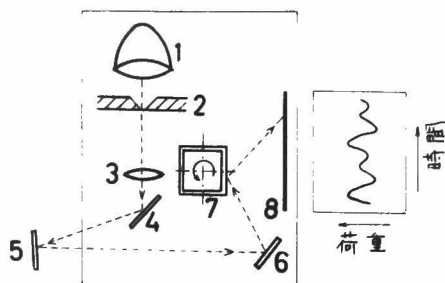


- 1 荷重検出棒
- 2 鏡
- 3 薄板ばね
- 4 反りめばね

第96図 荷重検出棒



第97図 応力波形測定装置



- | | |
|--------|------------------|
| 1 ランプ | 5 荷重検出棒に取り付けた反射鏡 |
| 2 スリット | 6 反射鏡 |
| 3 レンズ | 7 回転四面鏡 |
| 4 反射鏡 | 8 スクリーン |

第98図 応力波形測定箱内部（光学系）

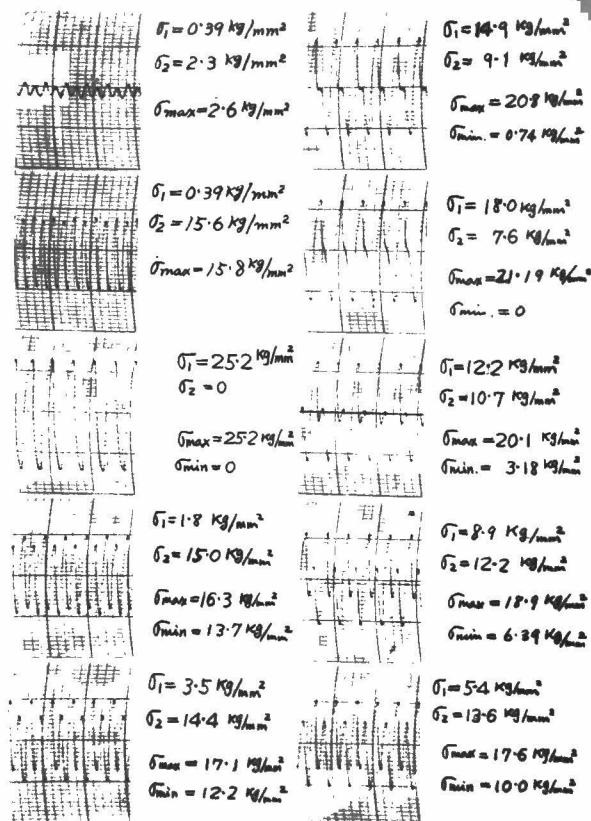
には応力波形は1本の直線となり、波形を知ることはできないが、その直線上の輝点によって応力波形の極値の値を知ることができる。

4・2・5 応力波形の一例

スクリーン上の応力波形は光量が弱いため記録ができないので、荷重検出棒に電気抵抗線ひずみ計を貼り付け、ペンオッシログラフで記録した応力波形の例を第99図に示した。こゝには本試験機が目的とする繰返し応力波形を発生し得ることのみを示し、複調和応力波形の試験結果および考察は4.6において述べることにする。

4・3 試験方法

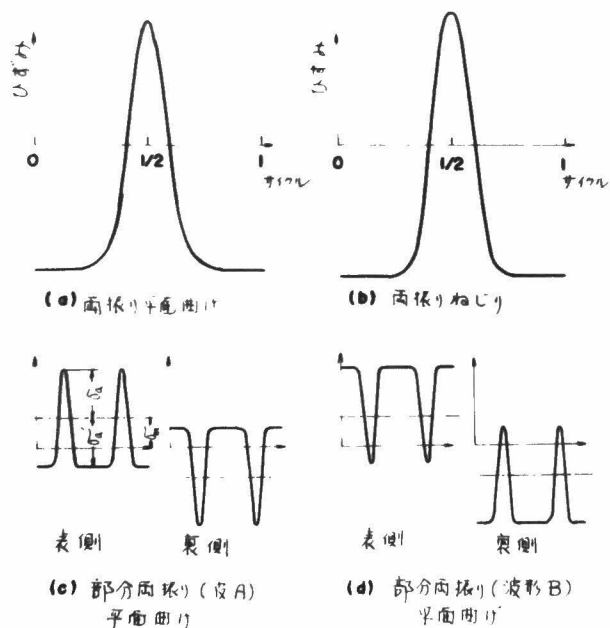
応力波形が疲れ強さに及ぼす影響に関して、従来二、三の論文が報告されており、⁽⁵⁵⁾⁽⁵⁶⁾⁽⁵⁷⁾ 応力波形による影響が存在することが認められている。しかしながら最大応力・最小応力の間に小さな応力の波⁽⁵⁵⁾（二次応力波）があるとき、この応力の波の振幅が大になると疲れ寿命が減少するという結果、す



第99図 複調和応力波形の一例 (ペンオシログラフによる)

なわち軟鋼・ジュラルミン等比較的軟い材料では小さな波によっても疲れが進行し、硬鋼では波の振幅比が小なところでは二次応力波による疲れの進行は見られないという結果、および二次応力波の振幅の大きさによっては疲れ寿命が5倍にも増加するという結果などのように実験者、応力条件等によって異なった傾向の結果が報告されている。本章ではこれらの点を特に追求した。

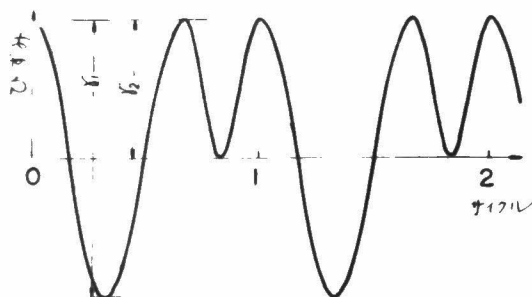
本章で行なった実験に用いた応力波形の種類は第100図に示したピーク波、第101図に示した双子波および第102図に示した複調和応力波および通常行なわれている正弦波の4種類である。
(59)
第100図のピーク波は通常三角波または衝撃波と呼ばれているものであるが、図示の如く完全に



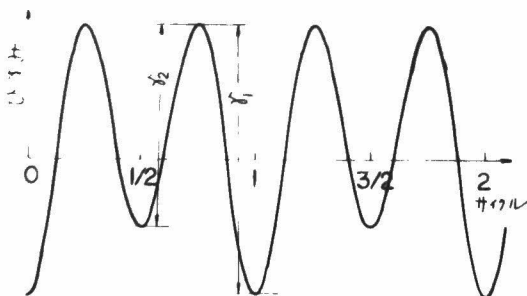
第100図 ピーク波形

三角波ではないのでピーク波と呼ぶことにする。ピーク波では両振りねじり疲れ試験および両振りと部分両振り平面曲げ疲れ試験を行なった。部分両振り平面曲げ疲れ試験においては試験片の表側と裏側には第100図(c)および(d)に区別して示したような応力が作用する。第101図に示した波形は最大ひずみの間（1サイクル中）に全ひずみ振幅の $1/2$ および $3/4$ の大きさのひずみ振幅の波をもつ波形である。この応力波形を双子波と呼び、両振りねじり試験を行なった。復調和応力波形は1サイクル中の2ケの応力の極値の比 $m = \sigma_2 / \sigma_1$ を変化させて両振り引張圧縮疲れ寿命の変化を研究した。繰返し数はすべて第100～102図中の1サイクルを繰返し数1として計算したものである。

正弦波と他の応力波形との疲れ寿命の比較をさらに明らかにするために、ねじり試験において応



(a) 双子波 1

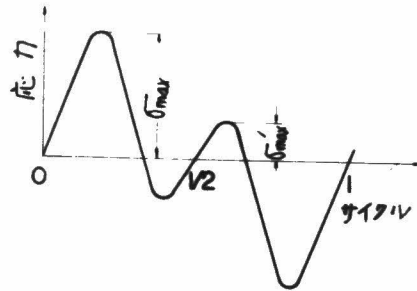


(b) 双子波 2

第101図 双子波形

力の一段階を特に選んで試験片各10本ずつを用いて疲れ試験を行ない、各波形による疲れ寿命に及ぼす影響の有無について統計的に検定した。

使用した試験機は平面曲げ疲れ試験には Upton-Lewis 式繰返し曲げ試験機、ねじり疲れ試験には Upton-Lewis 式繰返しねじり試験機、かつ引張圧縮疲れ試験には前述の複調和繰返し応力疲れ試験機である。両 Upton-Lewis 繰返し試験機は、本実験の目的のために、偏心機構を改造して用いた。そのため試験は定ひずみ型となり、第1章で述べたと同様に、繰返し数の増加とともに応力振幅が増加する。各波形によってこの応力振幅の変化がいかに相違するかも研究した。



第102図 複調和応力波形

なお第100図および第101図に示した波形を得るために波形を現出するカムを作り、このカムを試験機の偏心部に取り付けて実験を行なったものである。

各試験機の繰返し速度は平面曲げの場合200 cpm、ねじりの場合100 cpm、引張圧縮の場合1460 cpmである。

使用した材料は4種類の炭素鋼である。それらの化学成分・熱処理条件を第14表に、また機械的性質を第15表に示した。

試験片の形状は平面曲げ疲れ試験片は第3章の第76図(b)に、ねじり疲れ試験片は第1章の第1図Bに、および引張圧縮疲れ試験片は第94図にそれぞれ示した通りである。ねじり試験において

第14表 供試材の化学成分

素 材	実験条件	熱処理条件	化 学 成 分 (%)				
			C	Mn	Si	S	P
0.9mm厚圧延板	平面曲げ疲れ	860°C0.5時間焼鈍	0.23	0.42	0.008	0.049	0.016
28φ圧延棒	ねじり疲れ	875°C1.5時間焼鈍	0.21	0.58	0.25	0.042	0.030
〃	同統計的検定	〃	0.22	0.53	0.23	0.013	0.029
16φ圧延棒	引張圧縮	熱処理せず	0.35	0.59	0.16	0.017	0.026

第15表 供試材の機械的性質

実験条件	引張機械性質 (JIS 4号試験片)						ねじり機械性質		
	σ_{so}	σ_{su}	σ_B	σ_T	ϕ	ψ	τ_{so}	τ_{su}	τ_B
	(Kg/mm ²)	(Kg/mm ²)	(Kg/mm ²)	(Kg/mm ²)	(%)	(%)	(Kg/mm ²)	(Kg/mm ²)	(Kg/mm ²)
平面曲げ疲れ	30.4	29.4	44.4	78.0	35.0	50.4	—	—	—
ねじり疲れ	33	29	51	87	38	54	20.0	19.0	80.0
同統計的検定	32	28	48	84	36	54	19.7	18.5	53.3
引張圧縮	36.5	33.1	58.1	98.1	36.2	50.6	—	—	—

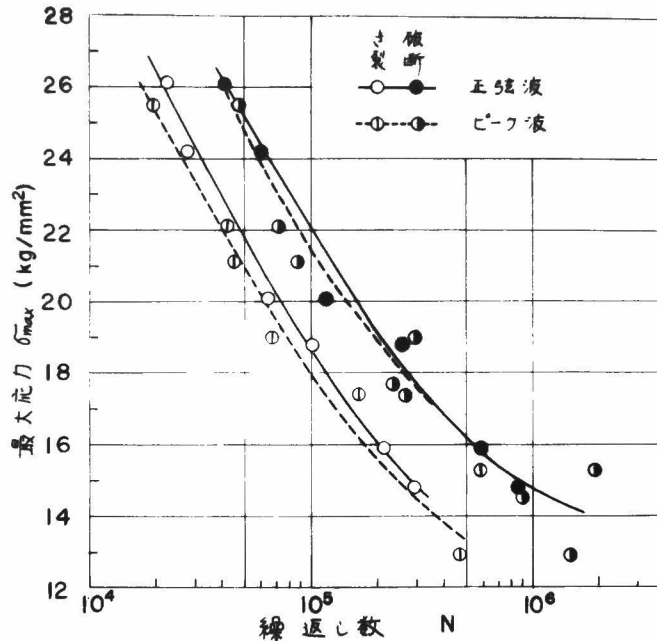
は負荷応力の値を変えるために第1章で説明したように試験片の平行部の長さを変えた。

4・4 正弦波応力とピーク波応力との比較

本節から4・7節まで実験結果を挙げ応力波形が疲れ強さに及ぼす影響について考察する。本節においては正弦波応力とピーク波応力とについて平面曲げおよびねじり疲れ試験の結果を述べる。

第103図に両振り平面曲げ試験の正弦波とピーク波の試験結果—S-N 曲線を示した。縦軸には繰返しの初期の応力振幅 σ_{max} を、横軸には破断までの繰返し数と試験片に疲れき裂が発生した繰返し数をとった。目に見えるき裂が発生する繰返し数比はほぼ $\log N = 0.5$ で、第81図に示した結果と同じである。第104図は両振りねじり疲れ試験の正弦波とピーク波のS-N 曲線を示したもので、縦軸の応力 τ は繰返し中応力振幅の変化が現われなくなったときの応力振幅を、横軸には破断の前に試験片にき裂が発生して応力振幅が減少して 16 Kg/mm^2 になったときの繰返し数をとった。

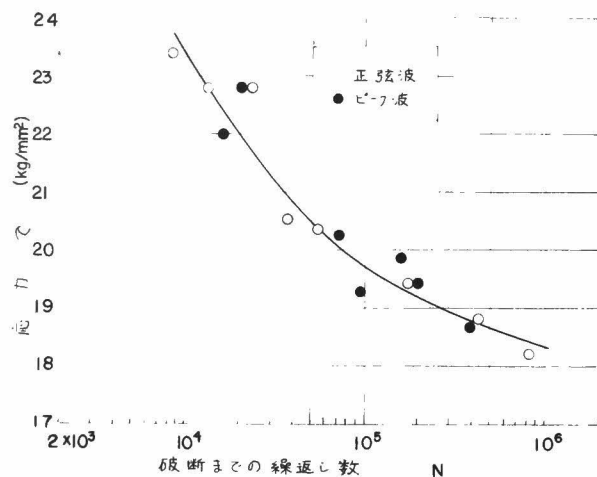
第103図における両振り平面曲げ疲れ試験において試験結果のばらつきを考慮したとき正弦波とピーク波において疲れ寿命に差があるとは断じがたいけれども、しいてS-N 曲線を引けば図のようになり、ピーク波のほうが若干弱くなっている。その場合、き裂発生時の繰返し数のほうが差が大きい、破断繰返し数ではほとんど差がないといえる。両振りねじり試験の場合には両波形による疲れ寿命の差はほとんど認められない。本実験に用いたピーク波と正弦波形とを比較すると、ピ



第103図 完全両振り平面曲げS-N曲線（正弦波とピーク波）

ーク波形では正弦波の約3倍の速さの振動と、最大応力に留っている時間の2つの要素が疲れ寿命に影響するといえる。しかし本実験に用いた繰返し速度の範囲では繰返し速度の影響は一般に認められていない。⁽⁶⁰⁾ またLiF についての実験ではせん断応力が 10 Kg/mm^2 のオーダーでは転位の速度は 10^4 cm/sec のオーダーになり、⁽⁶¹⁾ 最大応力に留っている時間が長いピーク波の方が転位の移動度は高くそれだけ早く破断に到ると考えられる。しかし繰返し速度の影響がない範囲では移動した転位は結晶粒界や介在物のところに止められてしまうため、最大応力に留っている時間の長短による差異は認められないと考えるべきであろう。

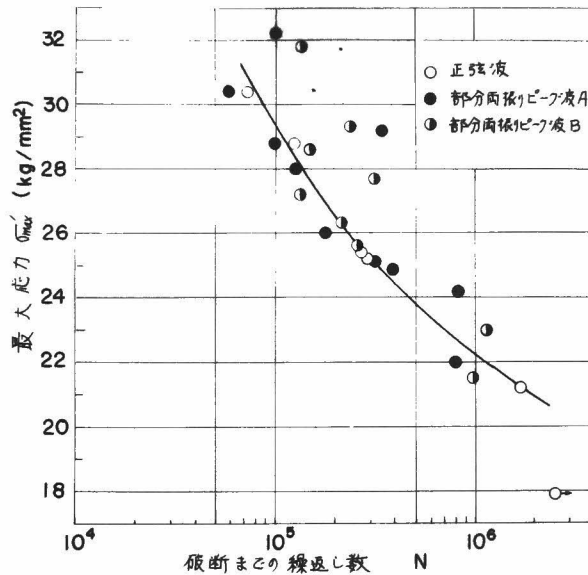
第105図は部分両振り平面曲げ疲れ試験の結果を示したものである。白丸は正弦波の部分両振



第104図 ねじりS-N曲線（正弦波とピーク波）

り。黒丸は第100図(c)のようにピーク荷重側に平均応力がある場合、半黒丸は波のピークと反対側の部分に平均応力がある場合（第100図(d)）を示す。平均応力の大きさは $\sigma_m' = 8.2 \text{ kg/mm}^2$ （誤差は $\pm 0.5 \text{ kg/mm}^2$ ）である。なお第106図の最大応力はいずれも $\sigma_{\max}' = \sigma_m' + \sigma_a'$ である。試験結果のばらつきを考慮すれば、三つの波形による部分両振り疲れ試験の結果の間に差があるとは断定できない。部分両振りの場合にはき裂の発生は正の最大応力、すなわち引張応力が大きくなる側面の切欠き隅から生じた。両振り平面曲げの場合にはどちらの側からも生じた。このことより波形によってき裂が発生する機構や、き裂が発生する繰返し数に差があるとは認められない。

ピーク波形において波形が平になっている最大ひずみのところで若干時間留っているが、この間に生ずる応力のリラクゼーションは最初の数10回の繰返しにおいて認められたが、それによって平均応力を生ずるには到らなかった。また正弦波とピーク波の応力-ひずみ履歴曲線にも何ら差異は認められなかった。



第105図 部分両振り平面曲げS-N曲線
(正弦波とピーク波)

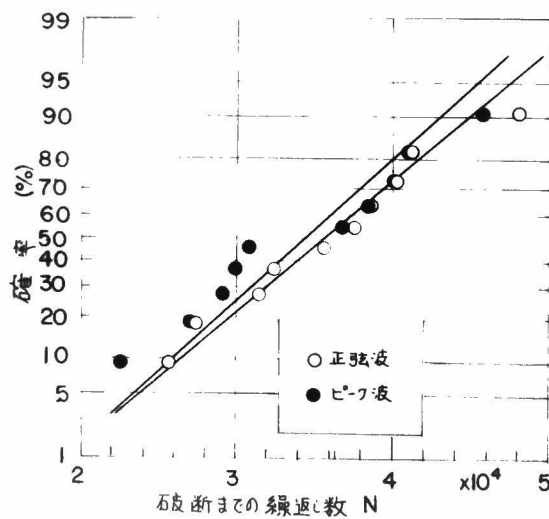
次に応力1段階を選んで行なった両振りねじり疲れ試験の統計的結果について述べる。実験した応力は $\tau = 20 \text{ Kg/mm}^2$ (その誤差は $\pm 0.2 \text{ Kg/mm}^2$ である) であり、試験片各10本ずつの結果を第16表および第106図に示す。第16表は正弦波とピーク波の各統計量を示したものであり、第106図は両波形の疲れ寿命の分布を確率紙に示したものである。有意水準5%のt検定によれば、両波形間の疲れ寿命の間に差があるとは言えない。また破断までの繰返し数を一様目盛で表わしたときも、対数目盛で表わしたときも、破断までの繰返し数の分布の仕方にはほとんど差がなく、またばらつきの変動係数も両波形において差は認められない。

以上の結果より正弦波とピーク波の間には疲れ寿命、疲れ強さの差は認められず、最大ひずみの

第16表 統計的結果
(正弦波とピーク波の場合)

統計量	正 弦 波	ピーク波
試験片数	10	10
$\bar{N}^{(1)}$	35480	34430
$S_N^{(2)}$	7050	6470
$S_N/\bar{N}^{(3)}$	0.198	0.188
$\log N^{(1)}$	4.5409	4.5293
$S \log N^{(2)}$	0.0904	0.0817
$S \log N / \log N^{(3)}$	0.0199	0.0180

(注) (1) 上ツキ線は平均値
(2) Sは標準偏差
(3) 変動係数

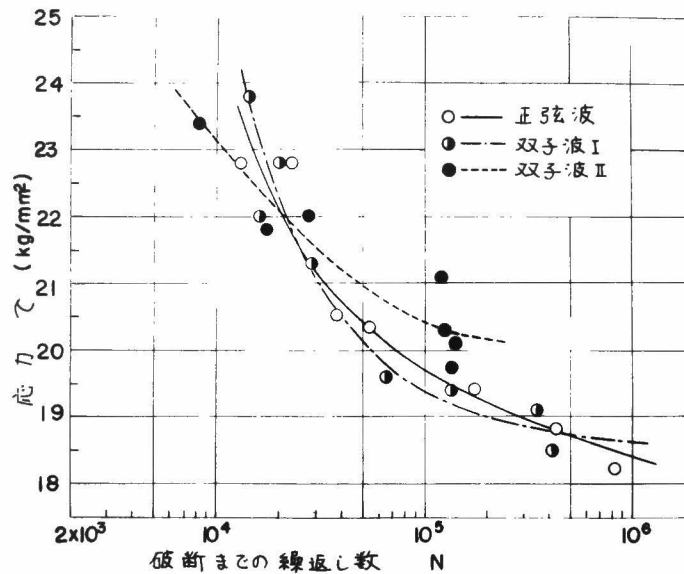


第106図 疲れ寿命の分布

ところで若干時間留っていることの影響も認められないと言える。

4・5 正弦波応力と双子波応力との比較

第107図に両振りねじり疲れ試験の正弦波と双子波の試験結果を示した。縦軸および横軸の説明は第104図の場合と同じである。双子波Ⅰと正弦波との間には疲れ寿命の差は若干認められる程度であるが、双子波Ⅱでは明瞭に正弦波とは異なった疲れ挙動を呈している。すなわち応力が高いときには正弦波に比べ双子波Ⅱの疲れ寿命は短かく、応力が低くなると疲れ寿命は正弦波のそれより長くなっている。このことをさらに明瞭にするために第108図に示すようにひずみの極値間の大きさをそれぞれ r_1 、 r_2 とし、この比 r_2/r_1 を縦軸にとり、双子波の繰返し数 N_f の正弦

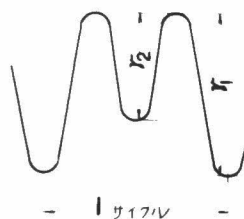


第107図 ねじり S-N 曲線
(正弦波と双子波)

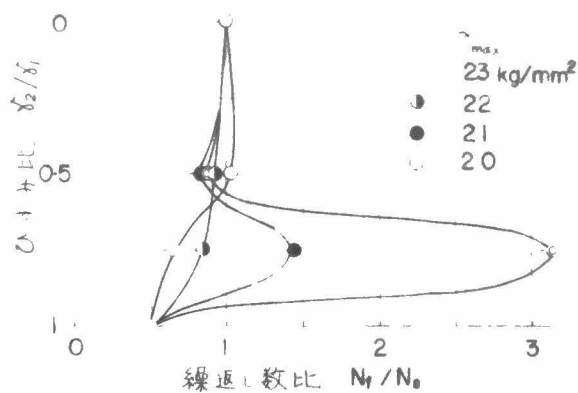
波の繰返し数 N_s に対する繰返し数比 N_f/N_s を横軸にとって、応力をパラメータにして示したものが第109図である。正弦波は $r_2/r_1 = 0$ および1に、双子波Ⅰは $r_2/r_1 = 0.5$ に、双子波Ⅱは $r_2/r_1 = 0.75$ に相当する。たゞし $r_2/r_1 = 1$ では $N_f/N_s = 0.5$ となるのは当然である。第109図より明らかなように、応力が高いときには $r_2/r_1 = 0.5$ においては $N_f/N_s = 1$ に近く、 $r_2/r_1 = 0.75$ においては N_f/N_s は1より小さくなり、双子波の疲れ寿命は正弦波の疲れ寿命より短くなる。この結果は、本実験のこの応力値の場合とほぼ同じ程度の繰返し数で破断する平面曲げ試験の結果と一致する。⁽⁵⁾ 応力が低くなると、ひずみ比 $r_2/r_1 = 0.75$ において繰返し数比 N_f/N_s の値は1より大きくなっていく。このことは2段2重あるいは2段多重重複繰返し疲れ試験において一次応力が耐久限に近く、かつ一次応力と二次応力の応力比が1に近いときには寿命が著しく増加するという結果に結びつくものであり、今後の研究の一つの問題点であると考えられる。

さて以上の事より次の諸点を結論づけ得る。

- (1) 疲れ寿命の比が $N_f/N_s = 0.5$ と1の間にはいると想像されるが、必ずしもそうでないこと。
- (2) ひずみ比 r_2/r_1 が小さい場合は、 N_f/N_s の値はほとんど1に近い値となっていること。
- (3) ひずみ比 r_2/r_1 が0.75の場合、寿命の増大が見られたがこの場合、特に寿命が増大するとき r_1 に相当する応力は処女材の降伏点に近くっており、降伏点と関係があるものと見られること。



第108図 双子波ひずみ波形



第109図 ひずみ比-繰返し数比線図

次に正弦波と双子波について応力値 $\tau = 20 \text{ kg/mm}^2$ の一応力段階で試験片各10本ずつを用いて行なった統計的結果について述べよう。第17表に試験結果の各統計量を、第110図に破断ま

第17表 統計的結果

(正弦波と双子波の場合)

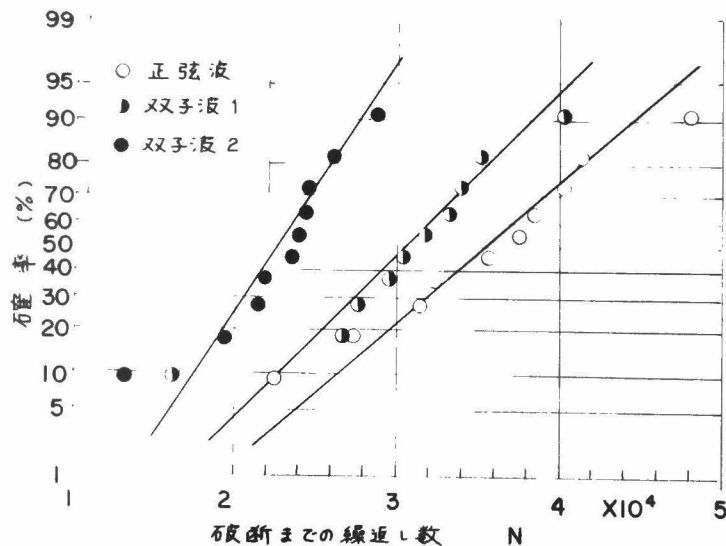
統計量	正弦波	双子波 I	双子波 II
試験片数	10	10	10
$\overline{N}^{(1)}$	35480	30450	22670
$S_N^{(2)}$	7050	6050	3940
$S_N/\overline{N}^{(3)}$	0.198	0.198	0.174
$\log N^{(1)}$	4.5409	4.4732	4.3475
$S_{\log N}^{(2)}$	0.0904	0.1010	0.0870
$S_{\log N}/\log N^{(3)}$	0.0199	0.0226	0.0201

(注) (1) \overline{N} , および $\log N$ は N および $\log N$ の平均値をそれぞれ表す。

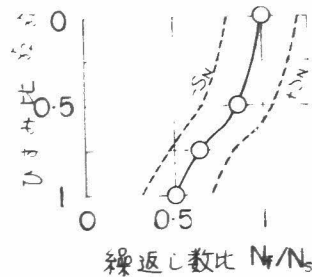
(2) S は標準偏差

(3) 変動係数

での繰返し数の確率紙上の分布を示した。応力値は $\tau = 20 \text{ Kg/mm}^2$ であるが、その誤差は前と同様 $\pm 0.2 \text{ Kg/mm}^2$ である。繰返し数を一様目盛で表わしても対数目盛で表わしても分布の仕方にはほとんど差はなく、また3つの波形のばらつきの変動係数も等しいと見なせる。有意水準5%のt検定によると正弦波と双子波Ⅰの間には疲れ寿命に差があるとはいえないが、正弦波と双子波Ⅱの疲れ寿命の間には差があると認められる。またこの応力段階において縦軸にひずみ比 r_2/r_1 、横軸に繰返し数比 N_f/N_s をとって、各波形の平均寿命を示したものが第111図である。図中実線は平均寿命を、破線は $(N_f \pm S_N)/N_s$ を示している。すなわち $\pm S_N$ (標準偏差) 内のばらつきの範囲を破線が示していることになる。第109図の結果と異なった傾向を示しているが、これは材料の相違によるものと見てよいが、いずれにしても双子波Ⅱのように r_2/r_1 の値が大きくなると二次波の影響が現われ、応力の大きさによって疲れ寿命は増加する場合も減少する場合もあることに



第110図 疲れ寿命の分布



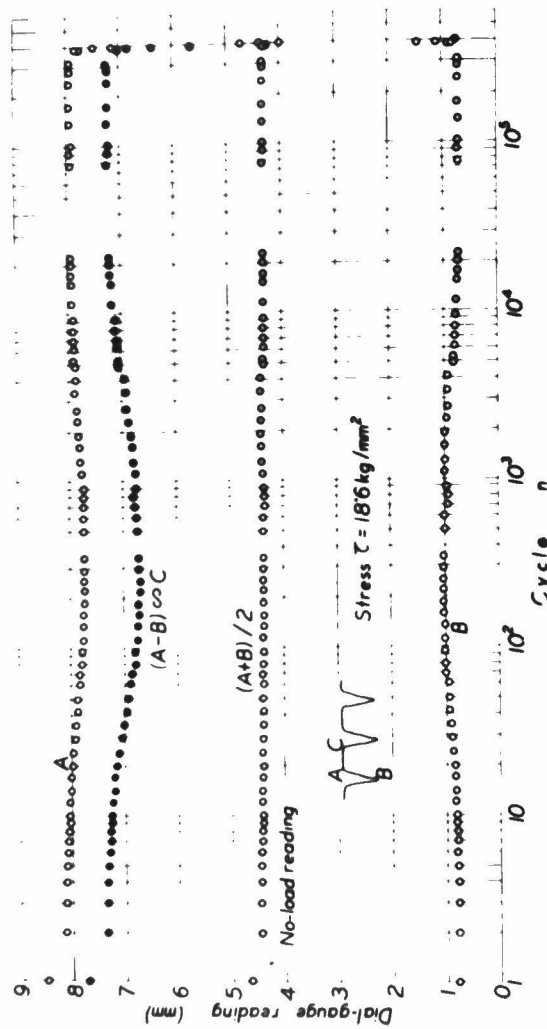
第111図 ひずみ比-繰返し数比曲線

注意すべきである。 r_1 に相当する応力が降伏点より大きいときには二次波は寿命を減じ、降伏点近傍において二次波は疲れ寿命を著しく増加せしめると言えよう。

4・6 応力波形の相違による応力振幅の変化の挙動

第1章において定ひずみ試験の際、疲れの進行に伴って生ずる応力振幅の変化の挙動について述べた。応力波形を変えたとき、この応力振幅変化の挙動も異なってくるであろうか。

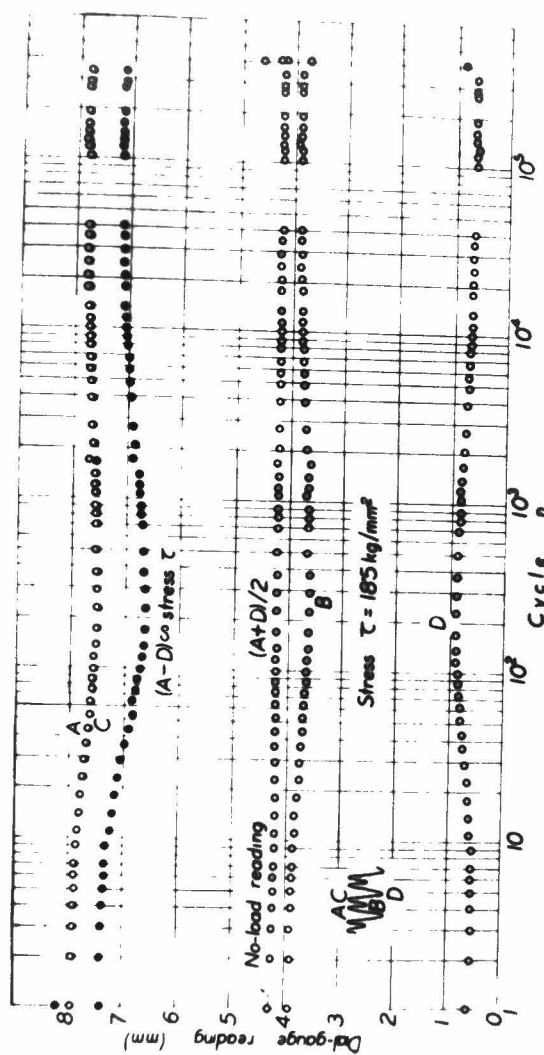
第112～114図の3図に繰返し数の増加に伴って生ずる各波形のねじり応力の極値点のダイヤルゲージの読みの一例を示した。第112図はピーク波におけるダイヤルゲージの読みで図中 $(A-B)$ は応力振幅に比例し、 $(B+A)/2$ と零点読みとの差は平均応力に比例する。この図より A および B と零点の読みとの差の変化の挙動は同一であり、ピーク波の応力の極値に留まっている平な部分 AC はこの応力振幅の変化の挙動に影響を及ぼしていないことがわかる。正弦波の場合の応力振幅の変化の挙動はまったくピーク波の変化の挙動と同じなのでこゝには省略した。第113図は双子波Ⅰの結果であり、図中 $(A-D)$ は応力振幅に比例し、 $(A+D)/2$ と零点の読みとの差は平均応力に比例する。この図より A および C と B とはまったく同様に変化し、 $A-B-C$ の部分の



第112図 応力振幅の変化（ピーク波）

応力-ひずみ履歴曲線は繰返しに伴って変化していないことがわかり、AB, BCの部分は弾性範囲内の振動であると予想される。しかしこのような応力-ひずみ履歴曲線のループを描かない微小振動が1サイクル中に数多く存在するときには疲れ寿命を著しく低下させるものである。⁽⁵⁸⁾

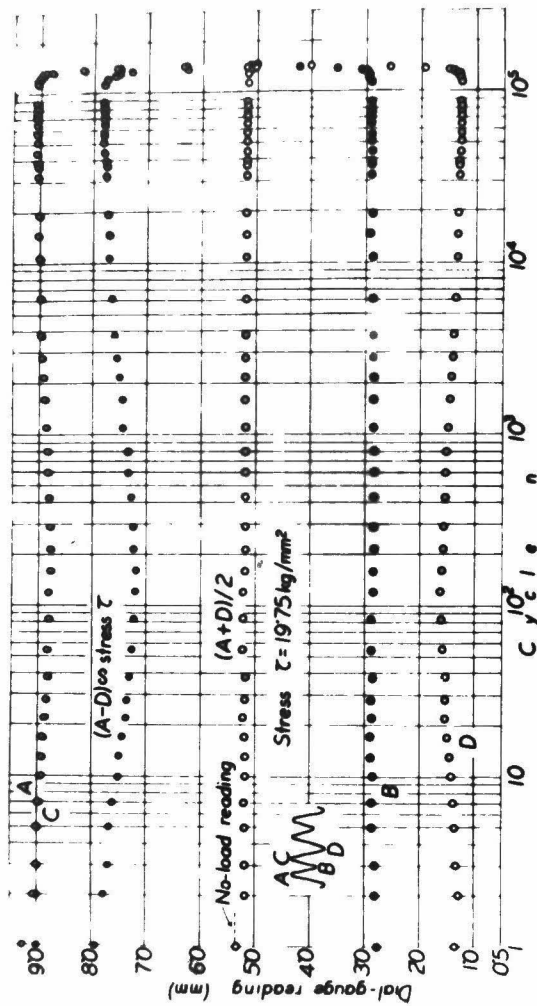
第114図は双子波Ⅱの場合であって、第113図の場合と同様に(A-D)は応力振幅に比例し、 $(A+D)/2$ と零点読みとの差は平均応力に比例する。双子波Ⅱの場合にはA, Cの変化とB



第113図 応力振幅の変化（双子波Ⅰ）

の変化の挙動は明らかに異なっており、したがってAB, BCの部分は繰返しとともに変化しているから明らかに応力-ひずみ履歴曲線を描き、そのループも繰返しとともに変化している。

これらの図において疲れの進行に伴う最大応力の振幅の変化は、繰返しの初めにおいて減少、次いで増加し一定値に達するという第1章において述べたものと同じ挙動を示しているが、これらの挙動は各波形とも変化はない。ただし双子波Ⅱでは挙動の進行が他の波形の場合に比べて早く生じている。これは1サイクル中に存在する応力-ひずみ履歴曲線のループを描く小振幅の振動の影



第114図 応力振幅の変化（双波II）

響であると考えられるが、第109図の結果よりもわかるように、このループを描く小振動が疲れ強さの強化に役立っていることは非常に興味深いことがらである。

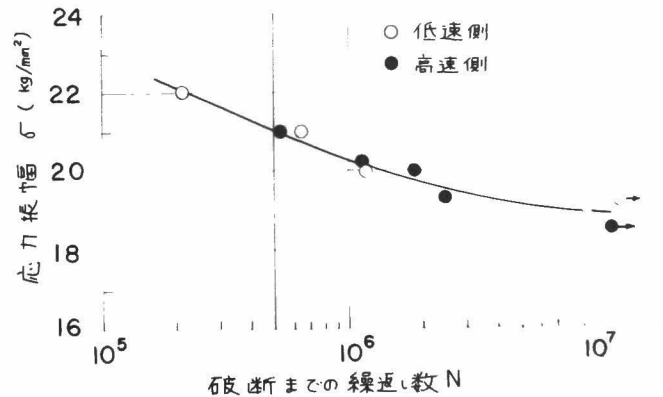
4・7 複調和応力波による疲れ強さ

4・2節で述べた複調和応力波疲れ試験機を用いて得られた実験結果について述べる。試験片の

形状および寸法は第94図に示したとおりである。

4・7・1 正弦波形による実験結果

正弦波応力による定応力疲れ試験結果を第115図に示した。白丸は低速側における実験結果、黒丸は高速側における実験結果であるが、図よりわかるように繰返し速度による差はほとんどないようである。

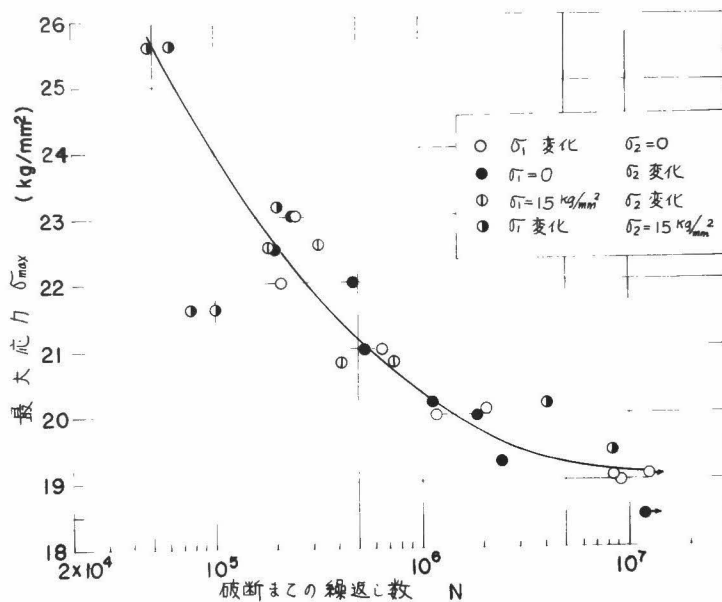


第115図 正弦波によるS-N曲線

4・7・2 複調和応力波による実験結果

次に複調和応力波による疲れ試験結果について述べる。第116図にその結果を示した。図中 σ_1 は低速側の応力振幅、 σ_2 は高速側の応力振幅である。白丸は低速側のみ、黒丸は高速側のみで①および②はそれぞれ σ_1 および σ_2 を 15 kg/mm^2 と一定に保ったときの結果である。第116図の縦軸は

$$\sigma = \sigma_1 \sin \omega t + \sigma_2 \sin 2\omega t \quad (22)$$

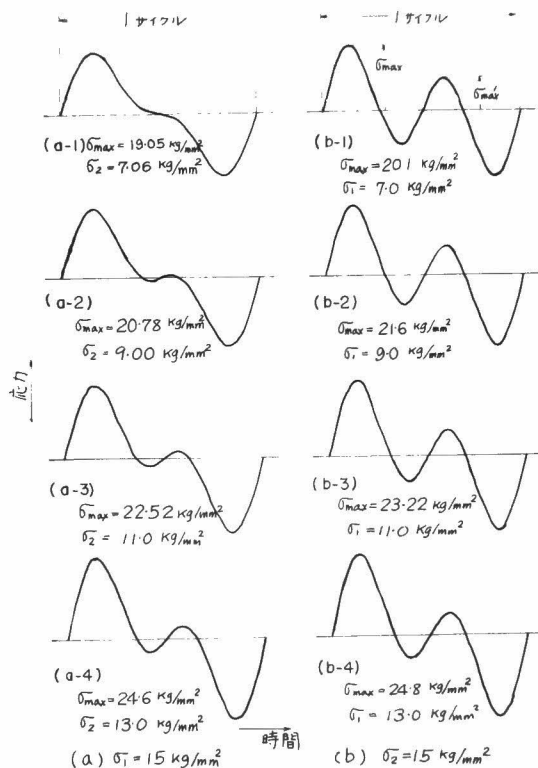


第116図 複調和応力波によるS-N曲線

の極大値 σ_{\max} を表わしている。第116図においては結果にかなりのばらつきがあって波形による相違はあまり見られない。

σ_1 を一定に保って σ_2 を変化した場合の応力波形の例を第117図に示した。 σ_2 が大きくなるに従い二次のピーク (σ_{\max}') が次第に大きくなるが、 σ_2 を一定にすると σ_1 が大きくなるに従い二次のピーク σ_{\max}' は逆に小さくなる。従って第116図に示した結果は二次のピークの影響をまったく考慮していないものである。

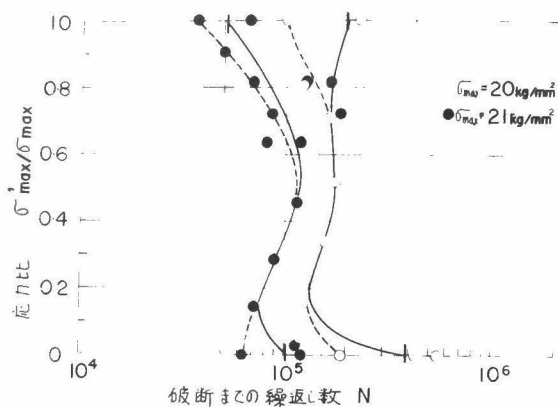
第118図に最大応力 σ_{\max} を一定にして、応力比 $\sigma_{\max}' / \sigma_{\max}$ を種々に変えた場合の実験結果を示した。たゞしこの場合には第115図、116図に示した材料とは別のロッドから試験片を採取したので若干実験結果は異なっている。実験結果には相当のばらつきがあるが、応力比 $\sigma_{\max}' / \sigma_{\max} = 0$ のとき寿命は最も長く $\sigma_{\max}' / \sigma_{\max} = 0.1 \sim 0.2$ で最も短くなる傾向を示している。しかし $\sigma_{\max}' / \sigma_{\max} = 0$ のときの三つの実験結果の内最も短い寿命の結果と他の応力比の



第117図 計算による応力波形

結果とを点線の如く結べば $\sigma_{\max}'/\sigma_{\max} \cong 0.6$ のところで寿命が最大になり、Serensen (56) の結果に類似してくる。実線は平均の点を結んだものであるが、点線の場合と同様 $\sigma_{\max}'/\sigma_{\max} \cong 0.6$ のところで寿命が極大になっている。この応力比のところでの二次ピーク σ_{\max}' の値は $12 \sim 12.6 \text{ Kg/mm}^2$ であり、第115図より明らかなようにこの値は処女材の耐久限以下の応力である。

Serensen の結果では応力はねじりであるが、 τ_{\max}'/τ_{\max} の値が0.5のところでは寿命は正弦波の寿命の数倍にも達している。したがってこれらの結果は単にピーク法、レンジ法等の整理法を用いても説明がつかないことは明らかである。



第118図 複調和応力疲れ試験結果

4・8 結 言

本章においては低炭素鋼を用いて平面曲げ，ねじり，引張圧縮疲れ試験を行ない，繰返し応力波形を二，三変えたとき，疲れ強さがどのように影響されるかについて研究した。平面曲げ，ねじり疲れ試験での結果は次のとおりである。

- (1) 正弦波とピーク波においては試験結果のばらつきを考慮すればそれらの間に疲れ寿命の差はないといえる。平面曲げ試験で平均応力が存在する場合にも波形による差は認められず，き裂が引張応力が大なる側に発生する傾向があることが認められた。
- (2) 正弦波と双子波においては，ひずみ比が0.5においては疲れ寿命に大きな差は現われないが，ひずみ比が0.75の場合には応力が高いときには疲れ寿命の低下，応力が低くなると疲れ寿命の増大となっている。したがって，双子波において最大ひずみ間に存在する二次応力波は応力の大きさによって疲れ寿命を増大する働きも，また減少する働きも持っていることがわかる。この結果は二段二重重複繰返し試験の結果と関連づけて考えることにより説明できるものと思われる。
- (3) 定ひずみ試験において，疲れの進行に伴う応力振幅の変化は各波形とも同じ挙動を示した。

次に引張圧縮疲れ試験においても上述の(2)と同様の結果が得られた。しかし応力の大きさ、および応力の種類が異なるため(2)で述べたようなはっきりした結果はでないが、応力比が0.6のときに疲れ寿命は他の応力比のときよりも増大する傾向が明瞭である。

重複繰返し応力の場合には普通実験の容易さにより、回転曲げの実験が選ばれている。この場合には前の応力段階の繰返しにより材料の硬化・軟化が材料に残留応力を生じしめこれが直線被害法則で計算される値より大きい寿命や小さい寿命を与えるものと解釈することができる。しかし3・3節および3・4節あるいは4・7節で述べたごとく引張圧縮試験においても曲げやねじりの結果と同様の傾向を示した。このことは

- (1) 引張圧縮でも材料が応力の繰返しを受けると材料内部に残留応力を生ずること、
- (2) 疲れの進行は直線的ではないこと、
- (3) 応力履歴を有する材料が新しい応力の繰返しを受けるときの疲れの進行は処女材のそれとは異なったものであること、

等が原因しているものと思われる。

またある大きさの応力の繰返しは材料の疲れ強さを高めるということも充分に考えられよう。

才 5 章 多段多重重複回転曲げ疲れ強さ

5・1 緒 言

実働荷重による疲れの研究の一つの方法として前章においては応力波形と疲れ寿命の関係について述べた。

すでに何度も述べているように、実際の機械や構造物の要素に作用する繰返し応力の振幅は一定ではなく、時間とともに変動している場合が多い。このような応力変動を再現させるような疲れ試験はその方法も、またこれに用いる装置もきわめて複雑であり、簡単に実施することは困難である。このため、比較的簡単な応力変動を示す繰返し応力の疲れ試験を行ない、これと通常行なわれる応力振幅一定の疲れ試験との関係を求め、一定応力振幅の疲れ試験結果より実働応力に対する疲れ強さを予測する方法を確立することが要望され、これまで多くの研究者が研究結果を報告しているのである。

しかしながら第 3 章においてすでに指適したように、簡単な二段二重重複繰返し応力、二段三重重複繰返し応力による疲れ試験が行なわれ、過大応力、過小応力の影響、コーキング効果等が見い出されているにも拘らず、実働荷重下での疲れに関する法則性は見い出されておらず多段多重複繰返し応力による疲れ試験、変動応力によるもの、ランダム疲れ試験、ランダム・ノイズ試験、音響疲れ試験等が行なわれ実働荷重に対する疲れ強さを求めているのが現状である。結局これらの事は簡単な実働荷重疲れ試験では、複雑な実働荷重の疲れ寿命を推定できないことを意味するものである。

すでに述べたごとく二段二重重複繰返し応力による疲れ試験を数多く行なう内に種々の疲れ挙動現象が現われ従来の繰返し数比で寿命を整理する方法が問題を本当に解決するものであろうかという疑問が生ずる。しかし今日の段階では直線被害則を用いてこれによる疲れ寿命と実験による疲れ寿命とを比較する方法が最善の方法である。

本章においては多段多重重複繰返し試験を行なうために試作した多段多重重複荷重負荷装置およ

び試験機について述べ、次に切欠材の二段多重、平滑材の三段多重重複繰返し回転曲げ疲れ試験の結果、および三段多重の場合の応力切換えに伴う試験片のたわみ変化の挙動について述べることにする。

多段多重重複繰返し応力試験を行なうために種々の複雑な機構の装置が作られているが、⁽⁶⁸⁾⁽⁶⁹⁾簡単な機械的機構を用いて複雑なプログラム疲れ試験ができることが望ましい。小野式回転曲げ疲れ試験機の負荷部分にカムの回転を利用して多段多重重複繰返し荷重を負荷できる装置を設計試作した。他の装置として全く新しい考えの下に任意の多段多重重複試験が可能な試験装置を設計試作した。後者の試験装置では段階的に応力変動を与えるのであるがその応力変動は上昇・下降荷重のみならず任意の凹凸状の応力変動をも与え得る。これらの装置について5・2節で述べる。

5・4節においては二段多重重複繰返し荷重に対する半硬鋼の切欠材の回転曲げ疲れ強さに関する実験結果を論ずる。平滑材についての二段多重重複繰返し荷重による疲れ試験は従来数多く行なわれ、ほゞ次のような結論に達している。直線被害法則による寿命の計算値は実験値と一般には一致しない。その傾向は一般に2段の応力比 σ_A/σ_a 、繰返し数比 n_A/n_0 および応力レベル σ_A/σ_w によって変化する。たゞし σ_w は処女材の耐久限度、 σ_A は応力二段の内高い方の応力レベル、 σ_a は低い方の応力レベル、 n_A は応力変動一周期 n_0 中高い応力 σ_A の繰返し数である。高応力 σ_A の繰返し割合 n_A/n_0 の値が小さいときには低応力 σ_a が耐久限度かそれより少し低い応力範囲にあるとき $\sum \frac{n}{N}$ の値は1よりはなほだしく小さくなるが、 n_A/n_0 の値が増し1に近づくほど $\sum \frac{n}{N}$ の値は1に近づく。⁽⁷³⁾切欠材に関する報告はあまり多くないようである。そのわずかの研究報告によれば、切欠き材の場合、実験による試験片の破断までの繰返し数は直線被害法則による計算値と比較的に一致するとされている。しかしこれらの研究報告では、試験範囲がごく限られた場合しか行っていないため、あらゆる試験範囲についても上述の結論が適用できるか否かは疑問である。5・4節では以上の意味において荷重状態を広範囲に変化させ、応力値、応力比および応力繰返し数比が切欠材の疲れ強さにいかなる影響を与えるかを実験的に研究するとともに、すでに報告されている平滑材による二段多重重複繰返し荷重による疲れ試験の結果の傾向と、本研究による切欠き材による傾向とを比較した。また本節における切欠材の傾向が、直線被害法則による計算値と必ずしも一致しないので、直線被害法則の式を修正する方法についても論ずる。

5・5節においては三段多重重複回転曲げ疲れ試験の結果について論ずる。三段多重重複繰返し

試験は二段多重と多段多重重複繰返し試験の中間的な意味での試験であり、このような試験を積み重ねた上でプログラムテスト、ランダムテストを実施すべきであると思われる。さて三段多重重複試験での荷重条件としては、二段多重重複繰返し試験において疲れ寿命の特に弱化することが認められた条件を選んだ。すなわち、二段多重疲れ試験において低いほうの応力 σ_a が処女材の耐久限度近傍において、また大きいほうの応力 σ_A の繰返し数比 n_A/n が小さい場合に、二段多重重複の疲れ寿命は直線被害法則から計算される繰返し数 Nth に比べて著しく減少する。したがって三段多重重複疲れ試験においては下段応力 σ_1 と中段応力 σ_2 の大きさを一定にし、上段応力 σ_3 のみを変化させた場合の一連の実験を実施し、破断までの繰返し数 N と Nth との比較を行なった。また応力比 σ_2/σ_1 および σ_3/σ_1 を一定にし、応力値を種々変えた場合についても実験を行なった。三段多重重複疲れ試験の研究において、本研究で選んだ実験条件ではプログラムテストやランダムテスト、あるいはさらに応力段数の多い多段多重重複疲れ試験の疲れ強さを推定するには難があるかもしれない。すなわち上段応力 σ_3 の作用する位置、繰返し数 n_3 を変化させることが破断までの繰返し数にいかなる影響を与えるかを知るほうが、実働応力下の疲れ強さをある程度予知できると思われるからである。

次に三段多重重複繰返し荷重を与える際に、試験片が呈するたわみ挙動について論ずる。第1章において一定応力振幅の際の試験片の変形挙動を、第3章において二段二重重複繰返し荷重を受ける際の試験片の変形挙動について述べた。5・5節においてはこれらと関連して試験片の変形挙動に関して考察し、多段多重重複疲れ試験における疲れ寿命との関係を論ずる予定である。

5・2 試作多段多重重複およびプログラム荷重負荷装置

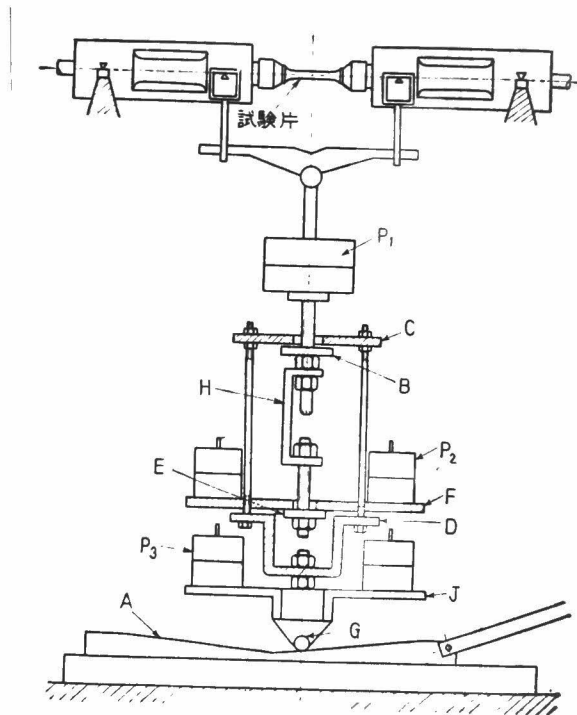
5・2・1 多段多重負荷装置

小野式回転曲げ疲れ試験機に取り付け得るようにした2種類の多段多重重複荷重負荷装置についてまず述べよう。

(a) 三段重複荷重装置

第119図は従来使用されていた二段重複荷重装置を改良して三段重複荷重を負荷できるようにした装置である。小野式の回転曲げ疲れ試験機に本来ついている荷重棒に荷重 P_1 が常時負荷されている。試験機とは別個の電動機によってカム板Aが左右に往復運動をすることによって荷重 P_2 、

(72)

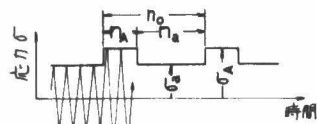


第119図 三段重複荷重装置

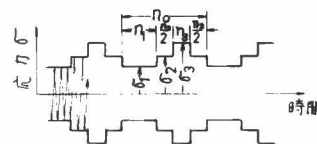
および P_2 が順次負荷および除荷されて三段多重重複荷重を与える。第119図の位置よりカム板 A が左に移動すると、ローラ G に固定された D が上に移動し E から F を持ち上げて荷重 P_2 を試験片から除荷する。またカム板が図の状態より右に移動すると、C が F に移動して B の上に乗る、ローラ G がカム板 A より離れて荷重 P_3 が試験片に負荷される。以上のようにして三段の荷重を負荷および除荷するが、繰返し数比の調整にはコ字型の接合片 H および C、D 部のナットを動かして、B と C、および E と F の間隔を変えることにより行なう。

(b) 五段重複荷重装置

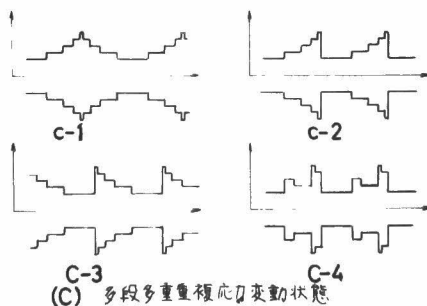
第120図に同じく五段多重重複繰返し荷重装置を示した。これも小野式回転曲げ疲れ試験機を



(a) 二段多重重複応力変動状態



(b) 三段多重重複応力変動状態



第121図 多段重複荷重変動状態

実施するには上述の荷重負荷装置では不充分であることが明らかである。また今日ランダム試験が種々行なわれているが、プログラム疲れ試験として解決さねばならぬ基礎的問題 — たとえば応力段数の影響、応力の順序の影響等 — が沢山あり、簡単なプログラム疲れ試験機が使えることが望まれている。

このような意味で試作したプログラム疲れ試験機について述べる。第122図に試作した試験機の外観写真を示した。試験片は片持の試験片で試験機の最上部にある。黒い三角形のブロックが沢

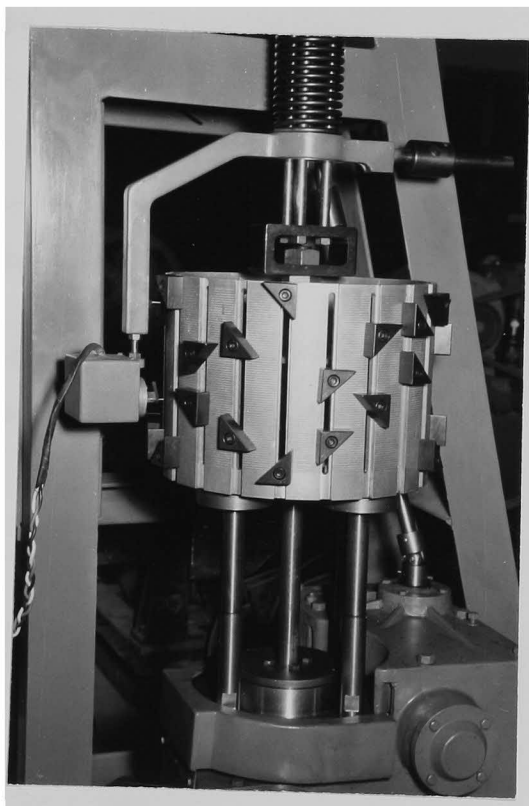


第122図 プログラム荷重回転曲げ疲れ試験機

山ついた円筒形のドラムはその上のコイルバネの上辺と結びつけられ、またバネの下辺は試験片他端の荷重棒と結びつけられている。試験片に加わる荷重はバネの変形による弾性力で与えられる。ドラムは試験片の回転に同期しゆっくり回転する。もしドラムが上下に動くことなく回転するだけならば、試験片に加わる荷重は一定となる。したがってドラムを他の機構により上下に移動させれば、その移動量だけバネの変形が生じ、試験片に加わる荷重も変化する。本試験装置はこのようにして

荷重を変動させるのであるが、次にドラムを上下移動させる機構について述べる。

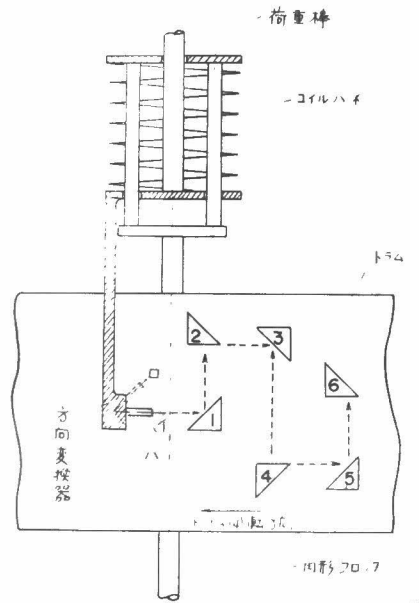
第123および124図に三角形のブロックおよびドラムの表面の展開図を示した。今第124図の位置でドラムが回転すると方向変換器の先端についている触手が三角形ブロック1に当たり、触手が①の水平の位置から②の位置に変わる。そうすると方向変換器内にあるスイッチが働いてモータを動かしドラムを速やかに下方に移動させ、触手がブロックの2に当る。2に当たると触手は②の位置から水平の①に位置に戻りドラムの下向移動は停止する。次にドラムは回転しているから、触手はブロック3に当たり、触手の位置を①から③にする。触手が③の位置になると、ドラムの上下運動をさすモータが逆転し、触手がブロック4に当る迄、ドラムを上向きに速やかに動かす。結局このような運動を順次繰返すことにより、試験片には、ドラムの上下の移動量に比例した荷重が増減され、第121図(C-2)～(C-4)図に示したような任意のプログラムプロ



第123図 荷重変動装置

ック荷重が与えられる。

ドラムには20本の細長い穴があけられており、この中に1組（第124図で1と2，3と4，5と6等）の三角形のブロックが固定されている。触手がブロックに当る位置を，ブロックを上下に動かして適当に調整することにより，負荷荷重の大きさおよび負荷時間を調節できる。



第124図 荷重変動装置

5・3 試験方法

本章において述べる実験は3種類あるのでそれぞれについて別々に述べる。

5・3・1 切欠き材の二段多重重複繰返し回転曲げ疲れ試験

実験に供した材料は0.36% C炭素鋼でその化学成分および機械的性質を第18表および第19表に示した。試験片を作るに要した素材は3本であり、これらを別々に熱処理したので素材および熱処理による試験結果のばらつきを考慮して、この3本の素材をそれぞれ素材A、BおよびCと呼んでいちおう区別して考えることにする。試験片の形状および寸法を第125図に示す。切欠きの形状は図示のごとく60°V環状切欠きで、形状係数は $\alpha_K = 3.0$ である。平滑材の二段多重重複疲れ試験の結果と比較する場合、切欠き効果の影響を顕著にするために形状係数を大にした。

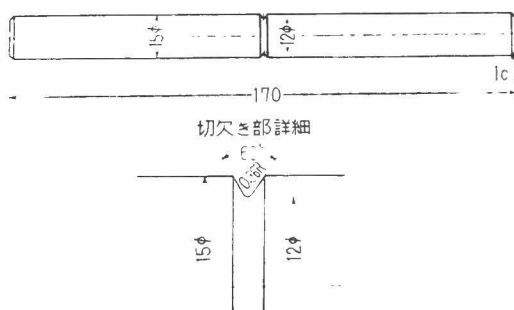
試験機は小野式回転曲げ疲れ試験機で、二段の重複荷重負荷装置は前述のものである。試験機の回転速度は毎分1780回転、応力二段の変動一周期 n_0 に要する時間は22.5秒、この間に試験片は667回転する。

第18表 供試材の化学成分

試験条件	熱処理条件	化 学 成 分 (%)				
		C	Mn	Si	S	P
多段多重重複	810°C0.5時間焼準	0.36	0.62	0.24	0.028	0.026
たわみ測定	750°C1時間焼鈍	0.34	0.57	0.26	0.029	0.020

第19表 供試材の機械的性質

	σ_{so} (Kg/mm^2)	σ_{su} (Kg/mm^2)	σ_B (Kg/mm^2)	σ_T (Kg/mm^2)	ϕ (%)	ψ (%)
多段多重重複	37	35	54	103	38	60
たわみ測定	31.1	34.9	53.8	92.3	31.0	52.2



第125図 試験片の形状・寸法（切欠き材）

応力変動状態は第121図(a)に示した通りである。図示のように高い応力振幅を σ_A 、低い応力振幅を σ_a とし、変動一周期の繰返し数を n_0 、 n_0 の内 σ_A の繰返し数を n_A 、 σ_a の繰返し数を n_a とする。本研究で行なった二段多重重複繰返し荷重の疲れ試験条件は第20表に示したとおりである。 n_0 は前述のように667回で一定に保ち、応力比 σ_A/σ_a および繰返し数比 n_A/n_0 を表示のごとく3種類ずつ組合わせた合計8種類の条件にて実験を行なった。

素材の差異による実験結果のばらつきを考慮して、素材A、B、Cについて応力一段のS-N曲線をそれぞれ求めた後、素材Aでは応力比 $\sigma_A/\sigma_a=1.1$ 、素材Bでは $\sigma_A/\sigma_a=1.4$ および素材Cでは $\sigma_A/\sigma_a=1.8$ の実験を行なった。

また実験開始に当っては、いずれの場合にも小さい応力振幅 σ_a から荷重が試験片に作用するようにした。

第20表 二段多重重複疲れ試験の試験条件

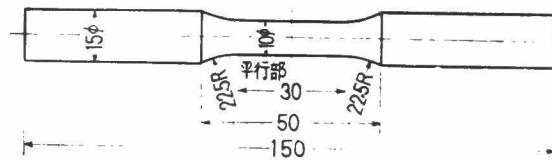
σ_A/σ_a n_A/n_0	1.1 (素材A)	1.4 (素材B)	1.8 (素材C)
1/2	0	0	0
1/5	0		0
1/20	0	0	0

5・3・2 平滑材の三段多重重複繰返し回転曲げ疲れ試験

供試材、使用試験機・試験装置は上述の二段多重重複繰返し試験のそれらと同じである。試験片の形状および寸法を第126図に示した。本試験に用いた荷重負荷装置ではすでに述べたように第121図の(b)に示したような三段重複荷重しかかけられない。同図で変動一周期の繰返し数 n_0 は667回、また試験機の回転速度は毎分1780回である。

三段重複の場合実験条件の選び方はきわめて多く、三段多重重複荷重の疲れ現象の全般的傾向を求めるためには数多くの実験結果を必要とする。したがって本研究においては緒言において述べた

ように、二段重複の場合に材料の疲れ寿命の減少が著しいと思われる実験条件について重点的に実験を行なった。二段多重重複荷重の結果より低いほうの応力 σ_a が耐久限度付近の値をとるとき、材料の疲れ寿命の低下が著しいことがわかっているので、本研究では下段および中段応力 σ_1 およ



第126図 試験片の形状・寸法（平滑材）

び σ_2 を耐久限度付近の値で一定に保ち上段応力 σ_3 のみを変化させ、繰返し数を種々変えた実験を行なった。次にこの実験より得た結果の中で疲れ寿命の低下が最も著しいと見られる繰返し数比で応力比を一定にして、応力域全般にわたる実験を行なった。

これらの実験条件を第21表に示した。表中実験(1)～(8)は σ_1 および σ_2 が一定、実験(9)および(10)は σ_2/σ_1 および σ_3/σ_2 を一定にした実験である。前述のごとく本研究では重点を材料の弱化的著しい場合においたため、繰返し数比の選定においても $n_3/n_0=1/20$ となる場合を多く含めた。実験(1)、(3)、(5)、(7)および(8)は $n_3/n_0=1/20$ である。また実験(2)、(4)、(6)および(7)は $n_2/n_0=n_3/n_0$ である。なお実験(8)は二段の場合であるが、これは $n_2/n_0=0$ となった特殊例と考えることができ、二段と三段の比較にも有効であるため特に含めた実験である。次に実験(9)および(10)では実験(1)の $n_1/n_0=3/4$ 、 $n_2/n_0=1/5$ および $n_3/n_0=1/20$ なる条件で応力比一定にしたものである。

実験はすべての場合下段応力 σ_1 より荷重が加わるようにした。

5・3・3 多段多重重複試験におけるたわみ変化の挙動

第21表 三段多重重複荷重疲れ試験条件

実験 番号	n_1/n_0	n_2/n_0	n_3/n_0	$\sigma_1 (Kg/mm^2)$	$\sigma_2 (Kg/mm^2)$
(1)	3/4	1/5	1/20	28.5 ($=0.95\sigma_w'$)	30.5 ($=1.05\sigma_w'$)
(2)	3/4	1/8	1/8		
(3)	1/2	9/20	1/20		
(4)	1/2	1/4	1/4		
(5)	1/4	7/10	1/20		
(6)	1/4	3/8	3/8		
(7)	9/10	1/20	1/20		
(8)	19/20	0	1/20		
(9)	3/4	1/5	1/20	$\sigma_2/\sigma_1=1.1$	$\sigma_3/\sigma_2=1.1$
(10)				$\sigma_2/\sigma_1=1.1$	$\sigma_3/\sigma_2=1.2$

(注) 実験(1)～(8)は σ_3 のみを変化

実験(9)～(10)は応力比、繰返し数比一定の実験

三段多重重複繰返しを行ない、試験片の 3 点のたわみ挙動をダイヤルゲージを用いて測定した。
供試材料は第18表および第19表に示した0.34% C炭素鋼である。

5・4 切欠き材の二段多重重複回転曲げ疲れ強さ

一定応力振幅（応力一段）の試験結果、および二段多重の疲れ試験をまず述べ、次に応力比、繰返し数比が疲れ強さに及ぼす影響、平滑材の結果との比較および切欠き材の二段多重疲れ試験の際の応力修正係数について考察する。

5・4・1 応力一段の疲れ試験結果

応力一段の場合の疲れ試験結果を第127図に示した。図において3本の素材による結果をそれぞれ区別して、実験点、および最小二乗法で求めたS-N曲線を示した。求めたS-N曲線の実験式は各素材について次のとおりである。S-N曲線の形を

$$\log_{10}(\sigma - \sigma_w') = A - B \log_{10} N \quad (23)$$

ただし

σ_w' は回転曲げ耐久限度 (Kg/mm^2)

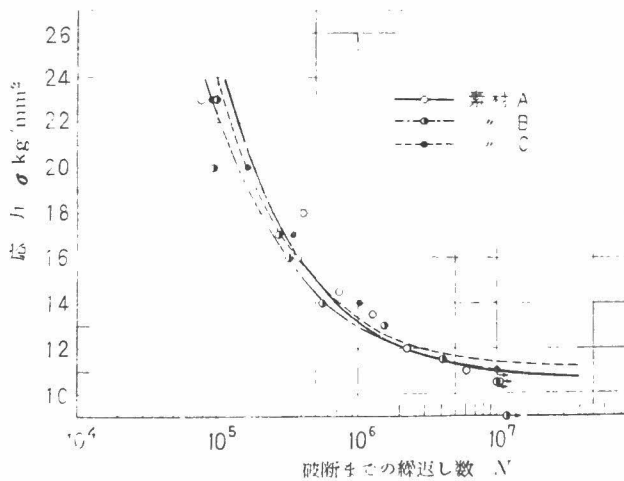
σ は応力振幅 (Kg/mm^2)

N は破断までの繰返し数

とおくと

素材Aでは $\log_{10}(\sigma - 10.5) = 4.832 - 0.7332 \log_{10} N$

素材Bでは $\log_{10}(\sigma - 10.5) = 4.433 - 0.6724 \log_{10} N$



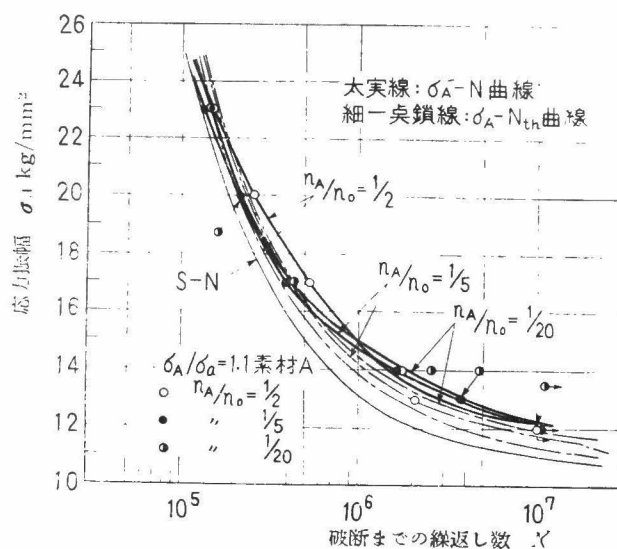
第127図 応力一段のS-N曲線

素材Cでは $\log_{10}(\sigma - 1.0) = 4.796 - 0.7364 \log_{10} N$

である。素材A, BおよびCによって実験式には若干の差があるが、第127図に見るごとくS-N曲線の間には大きな差は認められず、かつ疲れ寿命そのものに存在するばらつきを考慮に入れるならば、素材A, BおよびCの間のS-N曲線に本質的な差はないとみなしてよいだろう。したがって今後の考察においては、二段多重試験の疲れ寿命の計算には各素材のS-N曲線を用いるが、全体の考察においては素材間の差異は考慮しないこととする。

5・4・2 二段多重重複繰返し疲れ試験結果

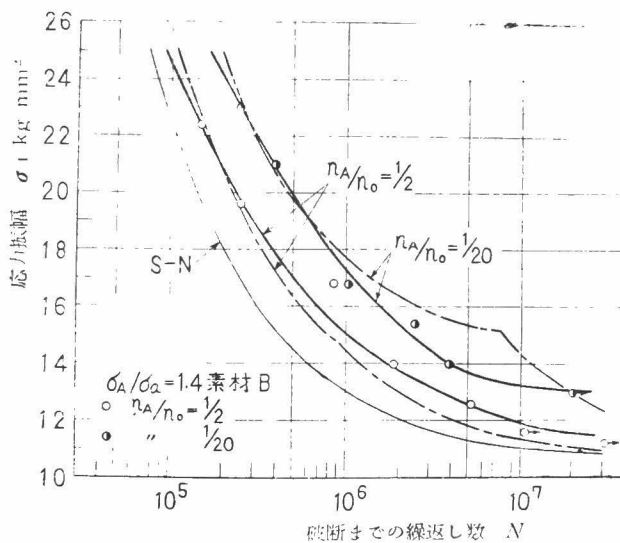
二段多重重複疲れ試験結果を第128, 129および130図に示した。縦軸には高い応力振幅 σ_A を、横軸には破断までの繰返し数 N をとった。図中太実線は目のこによる σ_A - N 曲線、細実



第128図 二段多重重複疲れ試験結果 ($\sigma_A/\sigma_a = 1.1$)

線は第127図に示した応力一段の場合のS-N曲線，また細一点鎖線は応力一段の疲れ試験結果より計算した直線被害法則による（すなわち累積繰返し数比が1になる場合の） σ_A -Nth 曲線を示している。

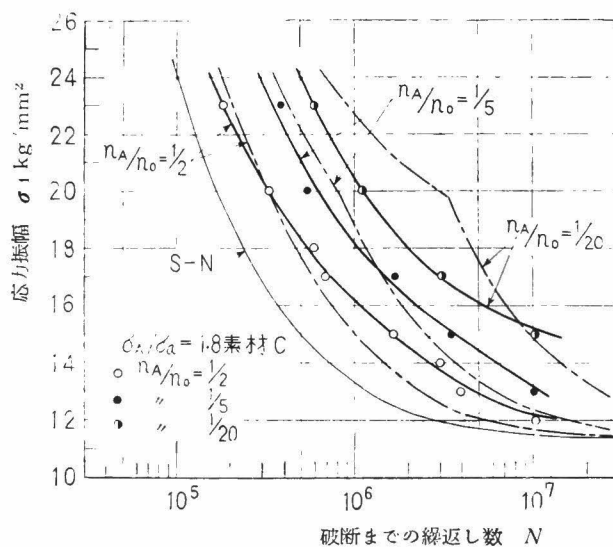
緒言においても述べたごとく，一般に切欠き材に関しては，累積繰返し数比積算値が1のとき破断するという概念（直線被害法則）による破断までの繰返し数の計算値Nth と実験値Nは比較的良好とされているが，本実験の第128～130図によれば合う場合も合わない場合もあることがわかる。すなわち第128図の $\sigma_A/\sigma_a=1.1$ の場合はNとNth は比較的良好一致し，高応力域では $N < Nth$ ，低応力域では $N > Nth$ の傾向が若干見られるようである。また $\sigma_A/\sigma_a=1.1$ の場合には n_A/n_0 の値による差はあまり顕著でない。第129図の $\sigma_A/\sigma_a=1.4$ の場合にはN



第129図 二段多重重複疲れ試験結果 ($\sigma_A/\sigma_a=1.4$)

と N_{th} の間にはかなり明瞭な差が現われている。すなわち高応力域では N と N_{th} とは良く一致しているが、応力が低くなるに伴い、 $n_A/n_0=1/20$ の場合には N は N_{th} よりも減少し、 $n_A/n_0=1/2$ の場合には N の値は N_{th} よりも全体に大きくなる傾向を示している。第130図の $\sigma_A/\sigma_a=1.8$ の場合には $\sigma_A/\sigma_a=1.4$ のときの傾向がさらに強まっているのがわかる。すなわち n_A/n_0 が小さいほど $N < N_{th}$ となり、 n_A/n_0 が大きくなるに伴い $N > N_{th}$ となる傾向が見られる。このように N と N_{th} との関係は実験条件および応力の範囲によって差があることが明らかとなった。

以上の結果をまとめれば次のようになる。高応力域では N は N_{th} と等しいかまたは若干小となるが、応力が低くなるに伴い n_A/n_0 が大なるときには N は N_{th} より大になる傾向を、 n_A/n_0 が小になるに伴い N は N_{th} より小となり σ_a が耐久限付近の値をとるとき N と N_{th} の差は最大になる。

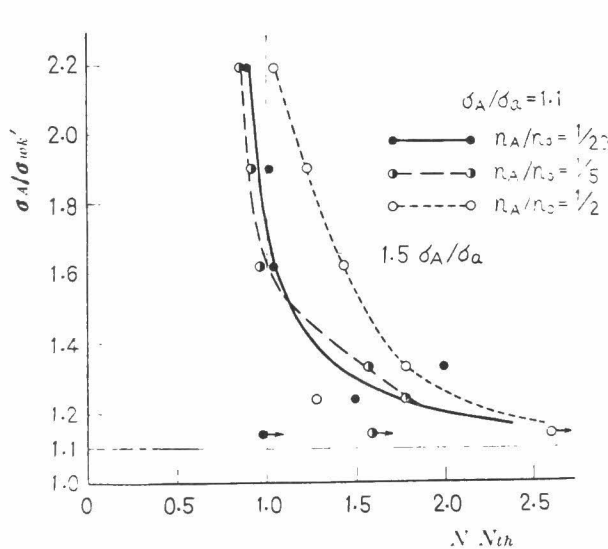


第130図 二段多重重複疲れ試験結果 ($\sigma_A/\sigma_a=1.8$)

さらに応力が低くなると N は N_{th} よりも大きくなる傾向を示す。

5・4・3 繰返し数比 n_A/n_0 が破断までの繰返し数 N に及ぼす影響

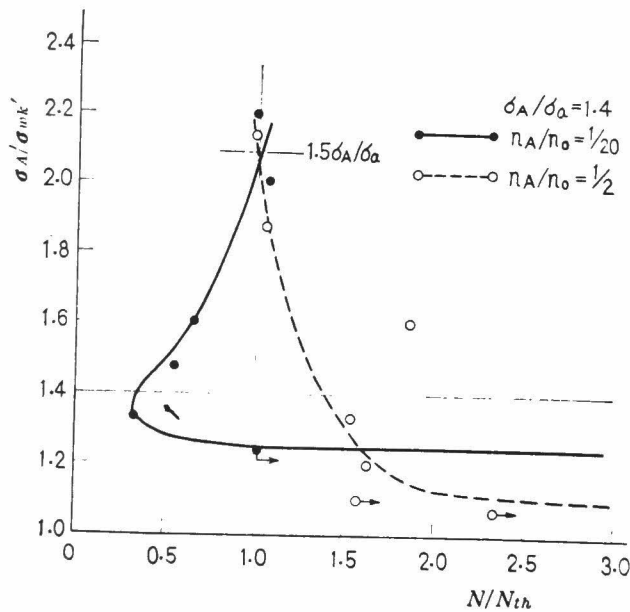
上述のように疲れ寿命に及ぼす n_A/n_0 の影響はきわめて大きい。第131～133図に σ_A と応力一段のときの耐久限度 σ_{wk}' との比 σ_A/σ_{wk}' を縦軸にとり、横軸に繰返し数比 N/N_{th} をとって実験結果を示した。いずれの図においても σ_A の値が大きい所では N/N_{th} の値は1に近くなっているが、 σ_A の値が低下するに従い n_A/n_0 の値によって N/N_{th} の値に差が生じてくる。特に応力比 σ_A/σ_0 が大になり、 n_A/n_0 が小の場合には N/N_{th} の値は σ_a が処女材の耐久限度付近で最小となっている。このことは高い応力 σ_A が断続的にわずかずつ作用するときには、特に材料に及ぼす影響が大きいことを示すものである。かつ耐久限度付近の σ_a の作用回数が多い程破断は N_{th}



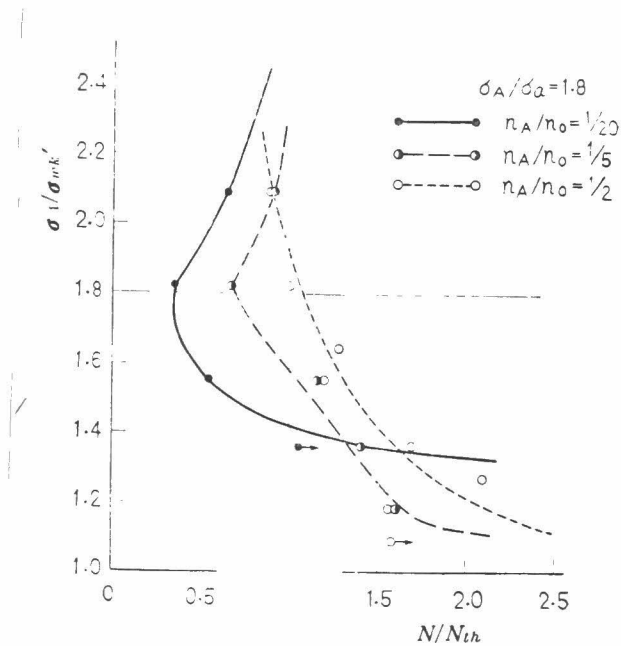
第131図 $\sigma_A/\sigma_{wk}' - N/N_{th}$ 曲線 ($\sigma_A/\sigma_a = 1.1$)

より早く起ることを示している。このことは直線被害法則では、応力一段のときの耐久限度以下の応力の繰返しをまったく無視することになるが、その不合理によるものと考えられる。応力二段の場合材料の疲れ被害の進行が応力一段の場合のそれと異なり（第3章参照），直線被害法則になんらかの修正，すなわち処女材のS-N曲線とは別のS-N曲線に基く修正を施すべきであることを示す。本章においては緒言において述べた応力修正係数を用いるが，これについては後述する。

また応力値が高くなると N/N_{th} の値が1に近くなることは近時盛んに行なわれている塑性疲れにおいて直線被害法則が適用できることを示すものである。



第132図 $\sigma_A/\sigma_{wk}' - N/N_{th}$ 曲線 ($\sigma_A/\sigma_a = 1.4$)



第133図 $\sigma_A/\sigma_{wk}' - N/N_{th}$ 曲線 ($\sigma_A/\sigma_a = 1.8$)

5・4・4 応力比 σ_A/σ_a がNに及ぼす影響

n_A/n_0 を一定にした場合の σ_A/σ_a の値が N/N_{th} に及ぼす影響について考察する。 $n_A/n_0 = 1/2$ および $1/5$ の場合には σ_A/σ_a の大きさによる影響はなく、 σ_A/σ_a の低下とともに N/N_{th} の値は増加する傾向を示す。 $n_A/n_0 = 1/20$ の場合には第131～133図より判断できるように σ_A/σ_a の値によってかなりの差が見られるが、 σ_a が処女材の耐久限度 σ_w' 付近で N/N_{th} が最小になるためである。 σ_A/σ_a の値は n_A/n_0 の値ほど N/N_{th} に与える影響はなく、 σ_A/σ_a が小なるほど N/N_{th} の値がやゝ大きくなるようである。

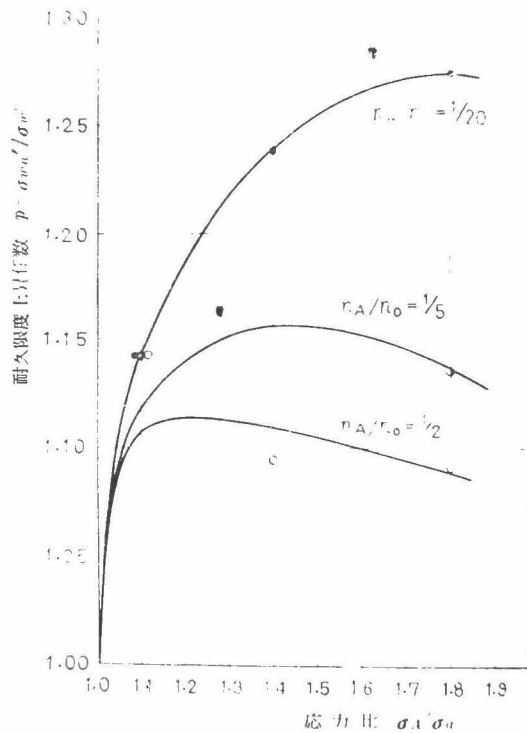
5・4・5 耐久限度の変化

こゝで二段多重重複荷重の際の耐久限度とは $\sigma_A - N$ 曲線が明らかに水平部を示したものはその水平部の応力値 σ_A を、水平部の現われなかったものでは繰返し数 10^7 における時間強度 σ_A を

さすことにする。この耐久限度を σ_{wn}' なる記号で表わし

$$p = \frac{\sigma_{wn}'}{\sigma_w'} \quad (24)$$

で表わされた耐久限度上昇係数 p を縦軸にとり、横軸に応力比 σ_A/σ_a をとって、耐久限度の変化を示したものが第134図である。いずれの条件でも耐久限度は上昇している。 $\sigma_A/\sigma_a=1.1$ の場合は各 n_A/n_0 の間で上昇係数に差は見られないが、応力比 σ_A/σ_a が大きくなるにしたがい、 n_A/n_0 の値によって耐久限度上昇係数 p に図のごとき差を生ずる。たゞこゝで注意すべきことは



第134図 耐久限度の変化

繰返し数比 n_A/n_0 が小の場合、著しい耐久限度の上昇が見られるが、これは繰返し数 10^7 における時間強度を取っていることも影響している。

耐久限度が上昇する原因として考えられることは σ_a による材料の強化作用、いわゆる過小応力効果がある。応力比 $\sigma_A/\sigma_a=1.1$ の場合において $\sigma_A=\sigma_{wn}'$ のときの σ_a の値は 10.9 Kg/mm^2 でもとの耐久限度 $\sigma_w'=10.5 \text{ Kg/mm}^2$ よりも大きくなっている。耐久限度以上の応力は一般に材料の弱化的効果を与えるといわれるが、 σ_A と σ_a の差がわずかで、ともに耐久限度に近い値であるときには二段重複の応力の相互作用によって σ_a は材料を強化する方向に作用するものと考えられる。しかし前述のごとく σ_A/σ_a が大になると σ_a が処女材の耐久限度 σ_w' に近いとき、 N/N_{th} の値が1以下で最小値となるということを考え併せると非常に興味深く、処女材の耐久限近傍の σ_a は σ_A/σ_a の値によって強化作用になったりあるいは弱化的作用を及ぼす。

なお応力比 $\sigma_A/\sigma_a=1.4$ の場合には重複荷重の耐久限度を示すときの σ_a の値は、 $n_A/n_0=1/5$ および $1/20$ に対し、それぞれ $\sigma_a=7.86 \text{ Kg/mm}^2$ および 9.29 Kg/mm^2 であり、 σ_w' に比べて25.2%および1.5%低い値である。また $\sigma_A/\sigma_a=1.8$ に対しては $n_A/n_0=1/2, 1/5$ および $1/20$ のときそれぞれ $\sigma_a=6.67, 6.94$ および 7.78 Kg/mm^2 であって σ_w' より39.4, 37.0および29.3%低い値となっている。

5・4・6 平滑材の実験結果との比較

比較の対象としては河本・中川の研究結果を用いる。平滑材による二段多重試験の結果の概要を述べると、高応力範囲では N/N_{th} は1に近いが、応力が低下するに従い N/N_{th} は1より小となる。この傾向は応力比 σ_A/σ_a が大、繰返し数比 n_A/n_0 が小の場合ほど著しい。さらに応力が下がると逆に N/N_{th} は1より大きくなり、耐久限度の上昇が現われる。種々の材料・試験条件を通じて二段重複の耐久限度付近を除いて $N/N_{th} < 1$ となる場合が多い。

一方本研究の切欠き材の傾向は、高応力域ではすべての場合 N/N_{th} は1に近くなるが、繰返し数比 n_A/n_0 が小、応力比 σ_A/σ_a が大の場合を除けば N/N_{th} の値は全般的に1より大となる。この点が切欠き材と平滑材のもっとも著しい相違点である。したがって切欠きの効果は高応力範囲ではほとんど現われないが、応力の低下とともに現われ、 N を N_{th} に近づけるかあるいは N を N_{th} よりさらに大きくする作用をもっていることがわかる。

なお定性的な応力比 σ_A/σ_a 、繰返し数比 n_A/n_0 がもつ N/N_{th} への影響は平滑材・切欠き材

とも変わらず、また σ_a が処女材の耐久限度 σ_w' 近傍の値をとるとき弱化的傾向がもっとも顕著となること、耐久限度上昇の傾向も、平滑材・切欠き材において変りはない。

5・4・7 応力修正係数

以上の考察で述べてきたように破断までの繰返し数 N は直線被害法則 $\Sigma (n/N) = 1$ による計算値 N_{th} とは一致しない。実験値が計算値と異なってくる原因は二段の応力 σ_A, σ_a が相互に影響を及ぼし合い、材料の疲れ寿命に与える被害効果が、 σ_A, σ_a が単独に作用する一定応力振幅の場合の被害効果とは異なってくるためであると考えられる。

さて二段多重重複荷重の場合、直線被害法則による破断までの繰返し数の計算値は

$$N_{th} = \frac{n_0}{\frac{n_A}{N_A} + \frac{n_a}{N_a}} = \frac{n_0}{\frac{n_A}{f(\sigma_A)} + \frac{n_a}{f(\sigma_a)}} \quad (25)$$

で与えられる。たゞし関数 $N=f(\sigma)$ は処女材のS-N曲線である。 σ_A, σ_a がともに耐久限度以上の場合に、 N_A, N_a に係数を乗じて(25)式を修正し、 N_{th} と N との一致を試みる方法が多く採用されているが、それでは耐久限度の上昇等の説明ができない。こゝでは σ_A, σ_a が相互に干渉し合って $k'\sigma_A, k\sigma_a$ になるという応力修正係数 k', k を用いて説明する。すなわち σ_A は σ_a の繰返しの影響を受けて $k'\sigma_A$ になり、 σ_a は σ_A の繰返しの影響を受けて $k\sigma_a$ になると考えれば、破断までの繰返し数の修正計算値は次のようになる。

$$N_{th}' = \frac{n_0}{\frac{n_A}{f(k'\sigma_A)} + \frac{n_a}{f(k\sigma_a)}} \quad (26)$$

(26)式の意味は二段の応力の相互干渉によって σ_A の応力に対しては $N=f(k'\sigma_A)$ 、 σ_a の応力に対しては $N=f(k\sigma_a)$ なる新しいS-N曲線が対応し、これらのS-N曲線において直線被害法則が成立すると仮定するものである。たゞし新しいS-N曲線といっても曲線の形 $f(\sigma)$ は処女材のそれと同じであり疲れ被害の進行そのものまで考慮した形ではない。

河本・中川らによれば、 k, k' は $\sigma_A/\sigma_a, n_A/n_0$ のみの関数とみなして k を寿命低下係数、 k' を耐久限度上昇係数と呼んでいるが、 k および k' の値は $\sigma_A/\sigma_a, n_A/n_0$ および σ_A/σ_w' の関数であることが今までの考察から容易に推察される。こゝでは k, k' をこれら3ケの値の関

数形として見出す方法について述べる。

σ_A の作用は σ_a を $k\sigma_a$ とし一般に材料を弱化させる。したがって k は材料の弱化を示す係数と言えよう。同様に k' は σ_a の作用によって生ずる材料の強化を示す係数と言えよう。

まず材料の強化を示す k' について述べよう。すでに述べたように重複荷重の耐久限度 σ_{wn}' は処女材の耐久限度 σ_w' より上昇する。 $\sigma_A = \sigma_{wn}'$ になったとき寿命は最大にかつ N/N_{th} も最大になる。したがってこのとき材料は最も強化されており、 k' が最小になると予想される。その最小値を k'_{min} とおく。 $\sigma_A < \sigma_{wn}'$ の範囲では試験片は破断しないのだから k' の値を考える必要はない。 k'_{min} は (27) 式の耐久限度上昇係数 p を用いれば次式で与えられる。

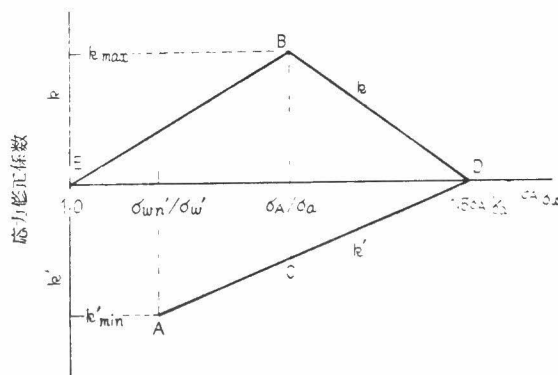
$$k'_{min} = 1/p \quad (27)$$

さてすでに述べたように高応力域では $N \cong N_{th}$ となるが、このときの応力の限界値は第 131 図より $\sigma_A/\sigma_w' \approx 1.5 \sigma_A/\sigma_a$ なる応力値である。この値以上では N と N_{th} とがほぼ一致し、材料の強化・弱化とも生じないと考えて $\sigma_A/\sigma_w' \geq 1.5 \sigma_A/\sigma_a$ で $k' = k = 1$ とする。また $\sigma_A = \sigma_{wn}'$ の点から $\sigma_A/\sigma_w' = 1.5 \sigma_A/\sigma_a$ の点までは k' は直線的に変化するものと仮定する。その作図の方法を第 135 図に示した。

次に材料の弱化を示す係数 k を求める方法について述べる。 k' の場合と同様に $\sigma_A/\sigma_w' \geq 1.5 \sigma_A/\sigma_a$ の範囲では $k = 1$ とする。 N/N_{th} の値が最小となる σ_A/σ_w' の値は σ_A/σ_a より小となる場合が普通であるが、第 132 図および第 133 図より本実験結果では $\sigma_a \cong \sigma_w'$ の付近であることより、材料の弱化が最も著しい応力値を $\sigma_A/\sigma_w' = \sigma_A/\sigma_a$ とする。この応力値で k は最大値をとり、その最大値 k_{max} は第 135 図の C 点の k' の値、および (26) 式より求めることができる。 k_{max} から $k = 1$ までの k の変化を直線的と仮定すれば第 135 図に示したように全応力域に対して k の値を定め得る。

上述の方法で求めた k_{max} および k'_{min} の変化のようすを第 136 図に示した。 k'_{min} は耐久限度の変化より (27) 式によって求めたもので、 σ_A/σ_a 、 n_A/n_0 の関数となっているが、 k_{max} は σ_A/σ_a のみの関数で n_A/n_0 の値には無関係になっている。

以上の方法により各試験条件に対して第 135 図に相応した応力修正係数 k 、 k' のグラフを求めることができ、各応力値における k 、 k' を (26) 式に代入し、修正計算値 N_{th}' を求めるこ

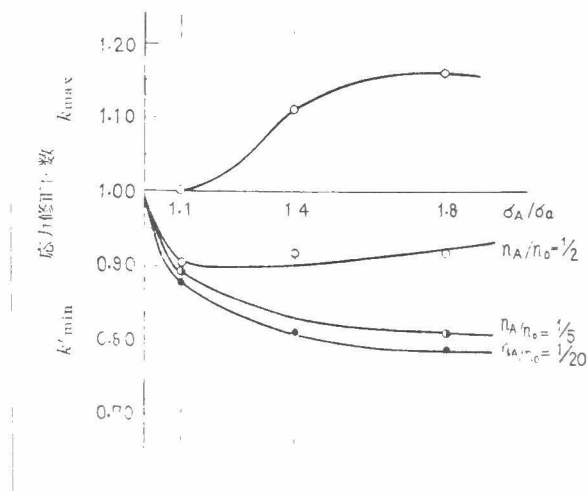


第135図 応力修正係数説明図

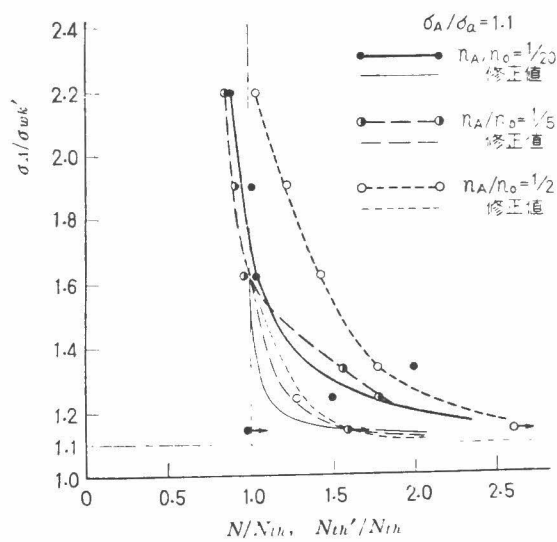
とができる。これを用いて $\sigma_A/\sigma_w' - Nth'/Nth$ 曲線を作り $\sigma_A/\sigma_w' - N/Nth$ 曲線と比較してみよう。第137～139図にその比較図を示した。図中太線が実験曲線 ($\sigma_A/\sigma_w' - N/Nth$)、細線が修正計算値 ($\sigma_A/\sigma_w' - Nth'/Nth$)、および $N/Nth=1$ の直線が直線被害法則より求めた計算値である。実験値 N と修正値 Nth' とが等しくなればこの両曲線は一致するはずである。

$\sigma_A/\sigma_a=1.1$ の第137図では修正値は実験値より小さくなり安全側にあるが、 $n_A/n_0=1/2$ の場合を除いて比較的良く合っている。 $\sigma_A/\sigma_a=1.4$ の第138図の場合にはきわめて良好な一致を示している。第139図に示した $\sigma_A/\sigma_a=1.8$ の場合には、 n_A/n_0 が $1/20$ および $1/5$ の場合に実験値が修正値より小さくで、 \times おりや \times 危険側にあるが、これは前述のように繰返し数10⁷ における時間強度を重複荷重の耐久限度としたことに原因があるものである。 σ_A/σ_a が大で n_A/n_0 が非常に小さい場合にはさらに厳密な水平部を求めて重複荷重に対する耐久限度とすべきである。

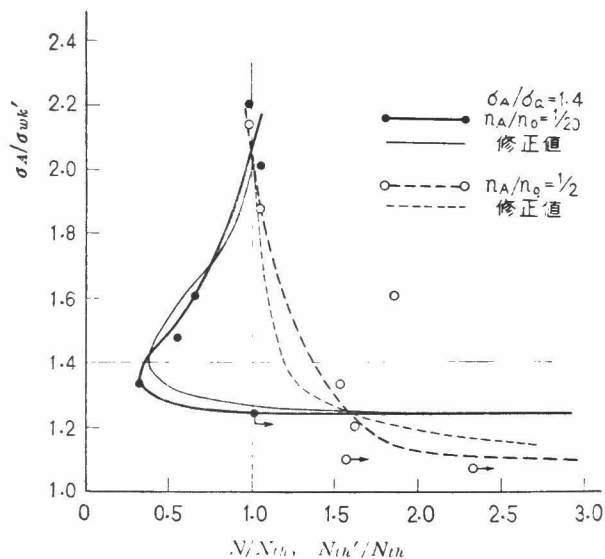
以上応力修正係数 k および k' を用いることによって、二段多重重複繰返し荷重に対する疲れ寿命を求め、それを実験結果と比較してみた。種々の試験条件に対する k_{max} , k'_{min} の値があらかじめわかっておれば、それらを用いて疲れ寿命を予知することができる。 k_{max} , k'_{min} を求



第136図 応力修正係数 k_{\max} , k'_{\min} の変化



第137図 実験値と修正値の比較 ($\sigma_A/\sigma_a=1.1$)



第138図 実験値と修正値の比較 ($\sigma_A/\sigma_a = 1.4$)

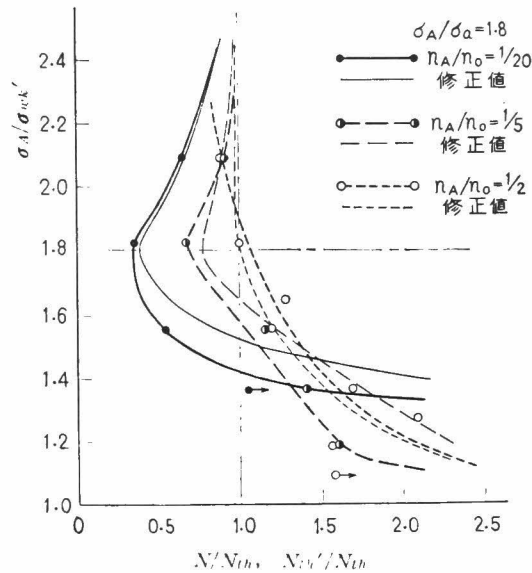
めるためには二段多重重複繰返し疲れ試験を全域にわたって行なう必要はなく，耐久限度を求める実験と σ_a を処女材の耐久限度に等しい値とする実験の2通りについて疲れ試験を行なえばよい。しかも後者の実験は繰返し数比には関係しないから，実験範囲はきわめて限られてくる。

5・5 三段多重重複回転曲げ疲れ強さ

応力一段（応力振幅一定）の場合の結果，三段多重の場合の結果を述べ，次いでこの結果について繰返し数比が及ぼす影響，二段多重の結果との比較，直線被害法則による計算値との比較等について考察する。

5・5・1 応力一段の場合の疲れ試験結果

第140図に応力一段の場合のS-N曲線を示した。実験値を最小自乗法によって描いたのが同



第139図 実験値と修正値の比較 ($\sigma_A/\sigma_a=1.8$)

図中の実線であり

$$\sigma - 3.0 = 28.30 - 3.401 \log_{10} N \quad (28)$$

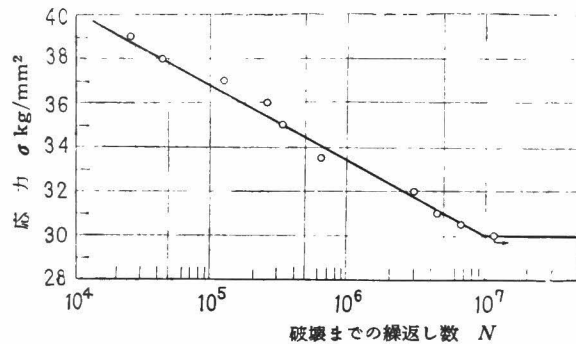
で表わされる。耐久限度は 30.0 Kg/mm^2 と定めた。また (28) 式および $\sigma_w' = 30.0 \text{ Kg/mm}^2$ の値より三段多重重複の実験(1)~(8)の下段および中段応力 σ_1 および σ_2 を第21表に示したように定めた。

5・5・2 三段多重重複疲れ試験結果

(a) $\sigma_1 = 28.5 \text{ Kg/mm}^2$, $\sigma_2 = 31.5 \text{ Kg/mm}^2$ に固定し σ_3 のみ変えた実験(1)~(8)

の結果

σ_1 および σ_2 を固定し σ_3 のみを変化させた実験(1)~(8)の結果を第141図(a)および(b)に示した。縦軸には上段応力 σ_3 をとり、横軸には破断までの繰返し数 N をとって示した。(a)図には



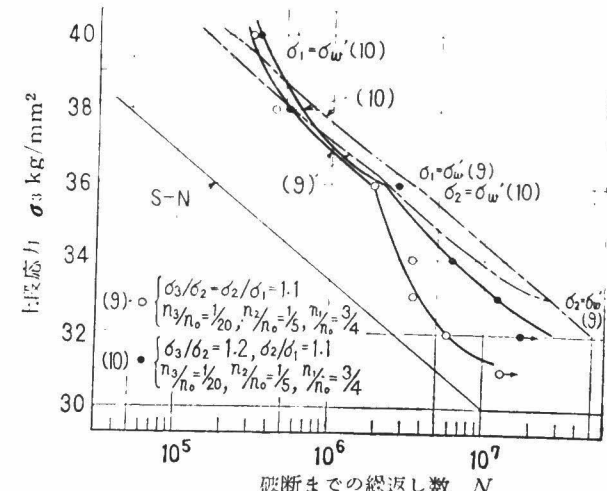
第140図 応力一段のS-N曲線

実験(1)~(4)を、(b)図には実験(5)~(8)の結果を示した。両図とも細実線は応力一段のS-N曲線を、太実線は実験点を結んだ σ_3 -N曲線を、また細一点鎖線は直線被害法則より求めた σ_3 -Nth曲線を示している。 $\sigma_2 = 3.15 \text{ Kg/mm}^2$ を現わす二点鎖線は σ_3 の取り得る最低の応力値を示すとともに $\sigma_3 = \sigma_2$ になったときは二段多重を表わすものでもある。したがって実験(1)と(2)、(3)と(4)および(5)と(6)は $\sigma_3 = \sigma_2$ の線上の実験点を共有する。

最初に予想したように全般的に疲れ寿命は著しく低下していることがわかる。 σ_3 が小さくなるにしたがって、疲れ寿命は直線被害法則より計算した値Nthよりも減少することが明らかである。 n_A/n_0 の等しい3組の実験(1)と(2)、(3)と(4)および(5)と(6)において共通のことは n_3/n_0 の小なるほうが寿命が大であることである。また実験(7)と(8)は n_1/n_0 の値は若干異なるけれども σ_3 -Nth曲線の間にはほとんど差がない。この両 σ_3 -Nth曲線をみると明らかに中段応力 σ_2 が存在する実験(7)のほうが寿命が大になっており、このことは実験(1)~(7)についてもいえることで σ_3 が小さくなって $\sigma_3 = \sigma_2$ となったとき、極度に疲れ寿命が減少することと相通じている。

実験(8)で $\sigma_3 = 3.15 \text{ Kg/mm}^2$ のときの実験結果は繰返し数が 10^7 を越えても破断に至っていない。ところが他の実験(1)~(7)では $\sigma_3 = \sigma_2$ になったときにはすべての試験片は破断している。これ

1	2
3	4
5	6

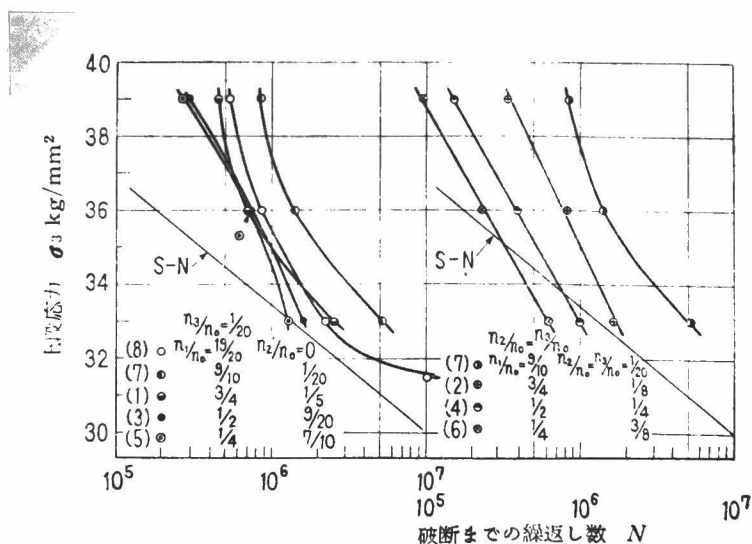


第142図 三段多重重複疲れ試験結果
(実験(9), (10))

$\sigma_3 > 36 \text{ kg/mm}^2$ の範囲では実験(9)と(10)の疲れ寿命の傾向はきわめて類似しており、したがって高応力域では σ_2 および σ_1 の値によっては N の値は影響を受けないものと思われ、 σ_3 の大きさのみによって疲れ強さは決るといえる。 $\sigma_3 < 36 \text{ kg/mm}^2$ の範囲では、応力比の小である実験(9)のほうが弱いようである。このことは二段の場合の繰返し数 10^7 における時間強度が、応力比が 大なるほど時間強度が大になるという結果と一致する。

5・5・3 繰返し数比の疲れ寿命に及ぼす影響

こゝでは直線被害法則による疲れ寿命 N_{th} は考慮せずに、繰返し数比 (n_1/n_0 , n_2/n_0 および n_3/n_0) と破断までの繰返し数 N との関連について述べる。第141図(a)および(b)に示した実験(1)～(8)の結果を書き換えた比較図を第143図に示した。同図の左半分は $n_3/n_0 = 1/20$ の場合である。既述のように実験(8)は中段応力のない応力二段の場合で、応力三段の実験(7)よりも疲れ寿命は短い。この応力二段の実験(8)を除けば他の4本の応力三段の σ_3-N 曲線は中段



第143図 n_2/n_0 , n_3/n_0 に対する σ_3-N 線図の比較

応力 σ_2 の繰返し数比 n_2/n_0 が大きくなるに従い疲れ寿命は減少しており、これはNthの順序と同じである。

第143図の右半分は $n_2/n_0 = n_3/n_0$ の場合である。4本の σ_3 -N曲線はほぼ平行となっており、各曲線の示す疲れ寿命の相互関係は $n_2/n_0 = n_3/n_0$ が大きくなるに従い疲れ寿命が減少している。そしてその減少の割合は、 $n_3/n_0 = 1/20$ と一定にしたとき n_2/n_0 の増大に従い疲れ寿命が低下する割合よりはるかに大になることが第143図の左右両図よりわかる。

これは明らかに上段応力 σ_3 の繰返し数比 n_3/n_0 による影響である。第143図の左図において実験(7)だけ特に寿命が長く、他のものはほとんど差がない。実験(7)では $n_3/n_0 = 1/20$ で $n_3/(n_2+n_3) = 1/2$ で、他は皆 $n_3/(n_2+n_3)$ の値が $1/5$ よりも小さくなっている。したがって三段多重の場合、疲れ寿命に及ぼす繰返し数比の影響は n_3/n_0 が一番大きく、次いで n_2/n_0 の値であるが、 $n_3/(n_2+n_3)$ の値が小さくなると中段応力 σ_2 の影響は小さくなるものといえよう。

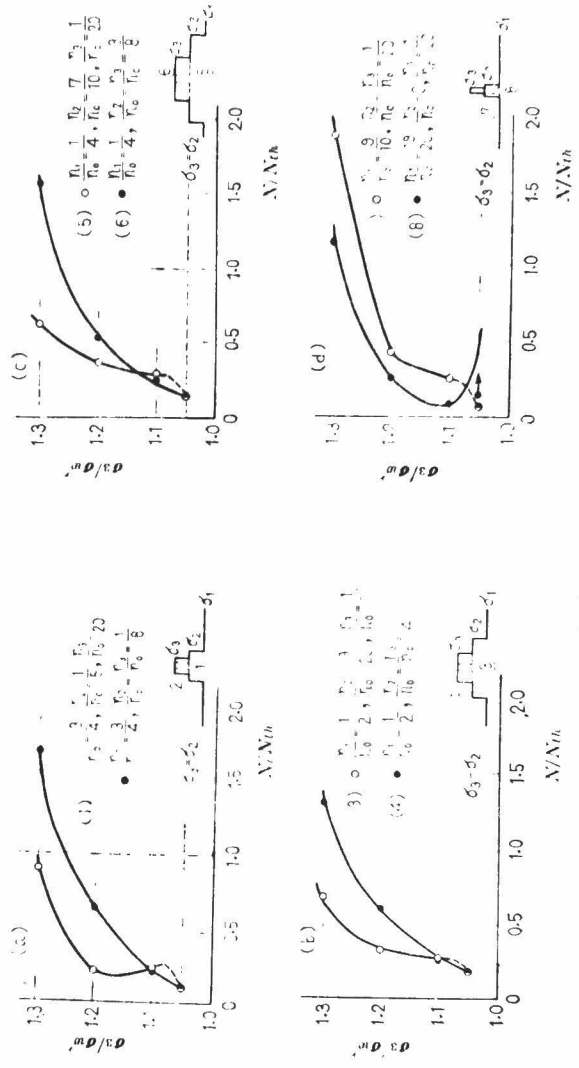
5・5・4 疲れ寿命の実験値Nと計算値Nthとの比較

(a) σ_1 , σ_2 一定で σ_3 を変えた実験(1)～(8)

実験(1)～(8)の結果を、縦軸に応力比 σ_3/σ_w' 、横軸に繰返し数比 N/Nth をとって示したものが第144図である。実験(7)および(8)を除いて $n_3/n_0 = 1/20$ のほうは N/Nth の値は小さくされており材料の被害が著しいことを示す。しかしこの差は σ_3/σ_w' の値が小さくなるに従い少くなり、 $\sigma_3/\sigma_w' = 1.1$ ではほとんど差は見られない。一方、 $\sigma_3/\sigma_w' = 1.3$ では $n_3/n_0 = 1/20$ の実験結果はすべて $N/Nth < 1$ (実験(7)および(8)を除く)で、 $n_2/n_0 = n_3/n_0$ の実験結果 (実験(7)をも含めて) はすべて $N/Nth > 1$ となっている。

第144図に示した横軸に平行な破線は上段応力 σ_3 が中段応力 σ_2 に等しくなった応力二段の場合であるが、このときの N/Nth の値はすべての実験において最小となっている。また、 $n_2/n_0 = n_3/n_0$ の場合には二段の点と三段の曲線がかなり滑らかにつながっているが、 $n_3/n_0 = 1/20$ の場合には曲線は滑らかにつながらない。このことより低応力域においては、二段の場合のほうが三段の場合より N/Nth の値が小となるといえるようである。このことはまた一般に重複荷重の際、応力比が小さいときに疲れ寿命が増大する傾向が見られるが、その傾向と似ているところがある。

さて第144図において $n_3/n_0 = 1/20$ の場合について考えると、 N/Nth の順は必ずしも $n_{2/40}$ の大きさの順になっていない。耐久限度以下の応力である σ_1 の繰返し数比 n_1/n_0 が増すほど、



$\sigma_2/\sigma_1 = 1.05, \quad \sigma_1/\sigma_2 = 0.95$

第144図 $\sigma_3/\sigma_1' - N/N_{th}$ 線図 (実験(1)~(8))

$\sigma_3/\sigma_w' = 1.3$ における N/N_{th} の値が大きくなっていることがわかる。したがって σ_1 は材料強化の過小応力効果を有していることがわかる。しかし σ_3 の値が減少するに伴って、 σ_1 の過小応力効果は少なくなるようである。

次に $n_2/n_0 = n_3/n_0$ の場合について考えると、実験(2),(4),(6)および(7)の間にはほとんど差がないことが第144図よりわかる。したがって本研究におけるような実験範囲では N/N_{th} の値に差を生ずる条件は前述のように n_3/n_0 の値よりも $n_3/(n_2+n_3)$ の値であるといえよう。

全試験について $N/N_{th} > 1$ となるのは $N < 10^5$ の範囲、 $N > N_{th}$ となるのは $N > 10^6$ の範囲であり、 $N/N_{th} = 1$ となるのは $N = 10^5 \sim 10^6$ および $\sigma_3/\sigma_w' = 1.25 \sim 1.35$ の範囲である。

(b) 応力比一定の実験(9)および(10)

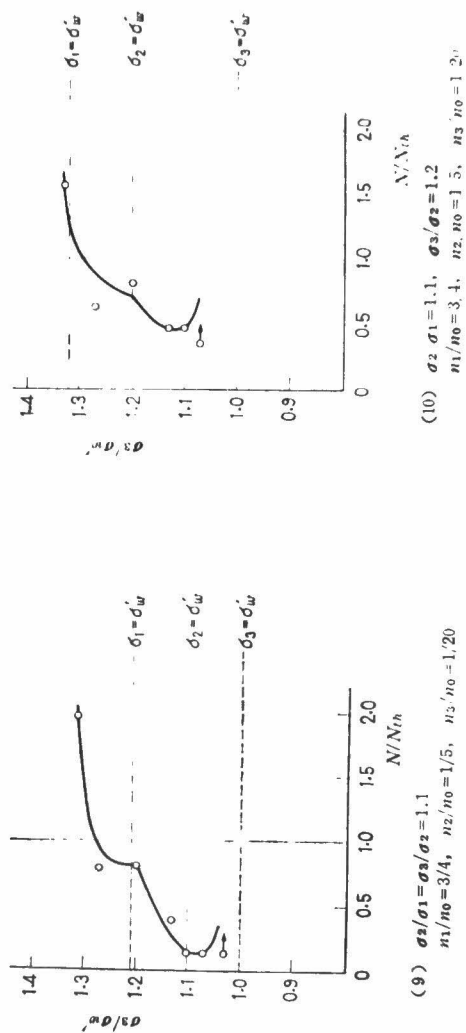
応力比を一定にした実験(9)および(10)の $\sigma_3/\sigma_w' - N/N_{th}$ 曲線を第145図に示した。両実験とも $\sigma_3/\sigma_w' = 1.3$ のところで $N/N_{th} = 1$ となり、 $\sigma_3/\sigma_w' > 1.3$ では $N/N_{th} > 1$ 、 $\sigma_3/\sigma_w' < 1.3$ では $N/N_{th} < 1$ となる傾向が明らかで第144図の場合とほぼ同じ傾向を示している。 $\sigma_3/\sigma_w' = 1.2$ のところで曲線に段がついていることは第142図の説明の際すでに述べたとおりである。二段多重の切欠き材の場合材料の弱화가特に著しかったのは、小さいほうの応力 σ_a が耐久限度付近の場合だったが、三段の場合にはそのような明らかな特徴はなく、実験(9)および(10)の両方の場合に $\sigma_3/\sigma_w' = 1.1$ の付近で N/N_{th} の値は最小となっており、最小値は実験(9)のほうが実験(10)の場合より小となっている。

以上の結果から明らかなように、三段多重の場合にも負荷応力の大きさによって疲れ寿命は直線被害法則より計算した値 N_{th} より大きくなる場合もまた小さくなる場合も生じる。したがって疲れ寿命を論ずるときは負荷応力の大きさ、繰返し数比等を抜きにして、直線被害法則より計算される値 N_{th} と比較するだけでは不十分である。

5・5・5 応力値に関する考察

すでに述べてきたように三段多重重複繰返し荷重による破断までの繰返し数 N と、直線被害法則によって計算された値 N_{th} との大小関係は上段応力 σ_3 の値によって大きく影響を受ける。本項では σ_3 の値によって N/N_{th} がいかに変化するかを簡単に説明する。

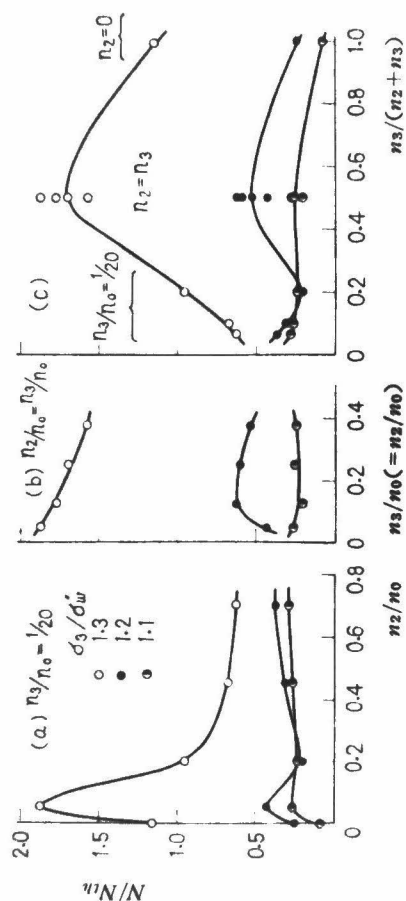
第146図は応力比 σ_3/σ_w' をパラメータにとり、繰返し数比に対する N/N_{th} の変化を示した



第145図 $\sigma_3/\sigma_w' \sim N/N_{th}$ 曲線
(実験(9), (10))

図である。(a)図は $n_3/n_0 = 1/20$ の場合を示したものであり、 $\sigma_3/\sigma_w' = 1.3$ の場合に N/N_{th} は大きく変化しているが、 $\sigma_3/\sigma_w' = 1.1$ および 1.2 ではほとんど変化が見られない。なお(a)図で $n_3/n_0 = 0$ の点は実験(8)の応力二段の場合の結果であり、三段の場合 ($n_2/n_0 \neq 0$) に比べて N/N_{th} の値は小さくなっている。(b)図は $n_2/n_0 = n_3/n_0$ の場合で $\sigma_3/\sigma_w' = 1.3$ に対して

は N/N_{th} の値はすべての n_2/n_0 に対して1より大きくなっているが, n_2/n_0 の増加とともに減少している。 $\sigma_3/\sigma_w' = 1.1$ および 1.2 では N/N_{th} の値はほとんど変化していないことがわかる。(c)図は横軸に $n_3/(n_2+n_3)$ の値をとって N/N_{th} の変化のようすを示したものである。図中 $n_3/(n_2+n_3) = 0.5$ の点は $n_2 = n_3$ の試験結果であり, $n_3/(n_2+n_3) = 1.0$ の点は実験(8)の応力二

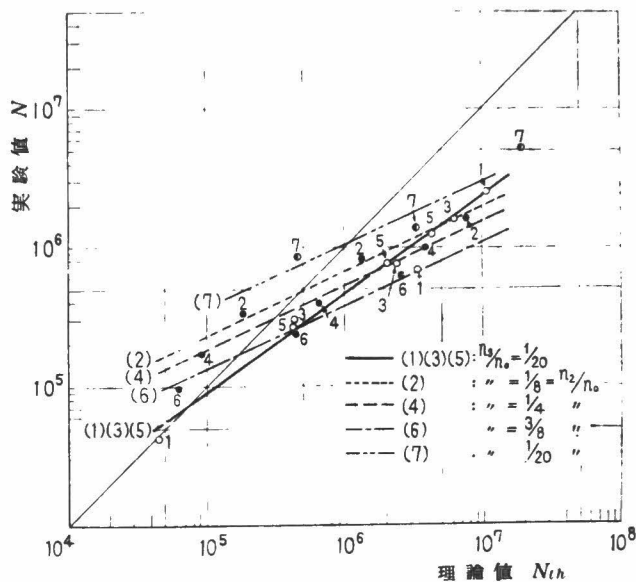


第146図 各応力値に対する N/N_{th} — n_2/n_0 , N/N_{th} — $n_3/(n_2+n_3)$ 線

段の場合の結果である。 $\sigma_3/\sigma_w' = 1.1$ および 1.2 の間では試験結果に顕著な差は見られないが、 $\sigma_3/\sigma_w' = 1.3$ では $n_3/(n_2+n_3) = 0.5$ までは直線的に N/N_{th} の値は増加していることがわかる。

以上のことより N/N_{th} の大きさを決定する最大の因子は、上段応力 σ_3 の大きさおよびその繰返し数比 n_3/n_0 であることが明りようである。すなわち $\sigma_3/\sigma_w' = 1.1$ および 1.2 に対しては繰返し数比 n_3/n_0 、 n_2/n_0 の大きさにはほとんど影響なく N/N_{th} の値が定まる。しかし $\sigma_3/\sigma_w' = 1.3$ に対しては n_2/n_0 および n_3/n_0 の増加に伴い N/N_{th} の値が減少する。また $n_3/(n_2+n_3)$ の増加に伴い N/N_{th} の値は増加する。さらに、すでに述べたように、応力二段の場合と応力三段の場合の疲れ寿命の挙動は異なっていることは第146図からも明らかである。

最後に第147図は破断までの繰返し数を、縦軸に実験値 N 、横軸に直線被害法則より計算した



第147図 破断までの繰返し数の実験値と理論値の比較

理論値 N_{th} をとって実験結果を示したものである。第143図の説明の際述べたように実験(1)、(3)および(5)の $n_3/n_0 = 1/20$ の結果はほぼ同一直線にのり、他の結果は図のように互いに平行な直線になっている。

5・5・6 二段重複および三段重複疲れ試験の比較

以上の考察においても再々二段と三段多重重複荷重による疲れ強さの比較を行なってきたので、ここでは箇条書にして二段と三段の差および類似点を挙げることにする。

- (1) 上段応力 σ_3 が中段応力 σ_2 に近づいて二段の応力状態に近づく時の疲れ寿命の傾向と、中段および下段応力のみを作用させた応力二段の場合の疲れ寿命の傾向とは著しく異なり、二段のほうが疲れ寿命は短い。上段応力 σ_3 の繰返し数比 n_3/n_0 が小さいほどこの傾向は著しい。
- (2) 三段の場合の応力比一定〔実験(9)および(10)〕で描いた $\sigma_3/\sigma_w' - N/N_{th}$ 曲線は二段の場合によく用いられる $\sigma_A/\sigma_w' - N/N_{th}$ 曲線と非常に良く似た傾向を示す。しかし高応力域において二段の場合には N/N_{th} の値が1に近づく傾向をもつのに対し、三段の場合には N/N_{th} の値は1よりはるかに大きくなる傾向を示す。
- (3) 三段の場合、下段応力 σ_1 の繰返し数 n_1 を無視して、中段応力に対する上段応力の繰返し数比 $n_3/(n_2+n_3)$ を用いて実験結果 N/N_{th} を表わすと、高応力域では $n_3/(n_2+n_3)$ が大きくなるにしたがって N/N_{th} は大となり、これは二段の場合の高応力域で n_A/n_0 が大きいほど N/N_{th} が大きくなるという傾向と良く一致している。

5・6 多段多重重複回転曲げ疲れ試験中の試験片のたわみ挙動

第1章において定応力および定ひずみねじり疲れ試験におけるひずみ振幅および応力振幅の変化を示したが、疲れ寿命の大部分においてこれらの振幅は一定であった。また第3章においては二段二重重複引張圧縮試験におけるひずみ振幅の変化を示したが、応力を切換えた後のひずみ振幅は処女材のそれとは異って一次応力の影響が現われていた。かつ二次応力におけるひずみ振幅は第62図に示したごとく疲れ寿命と関連があることが明らかとなった。

本節においては多段多重重複繰返し回転曲げ疲れ試験における、試験片の綱み部分のたわみ変化について述べ、応力履歴の影響に関して考察することにする。

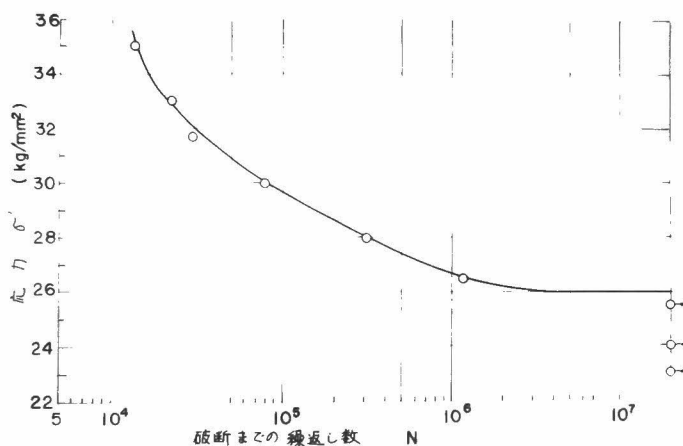
5・6・1 応力一段の結果

第148図に応力一段のS-N曲線を示した。実験結果はかなり滑らかな曲線上にのり、耐久限は 26 Kg/mm^2 となっている。第149図は疲れの進行に伴うたわみ変化を示したものである。繰返し数 n が 10^4 まではたわみが増加するもの、減少するもの、あるいは急激に変化するもの($\sigma = 28.0 \text{ Kg/mm}^2$)等があるがそれ以後はほぼ安定したたわみ変化を呈しているといえる。この定常状態におけるたわみと荷重応力振幅の関係を図示すると第150図の如くなり、 $n < 10^4$ におけるたわみ変化は材料が安定するまでの過渡的状态と言えるようである。なお第150図において応力23および 24 Kg/mm^2 の2点は耐久限以下の応力である。

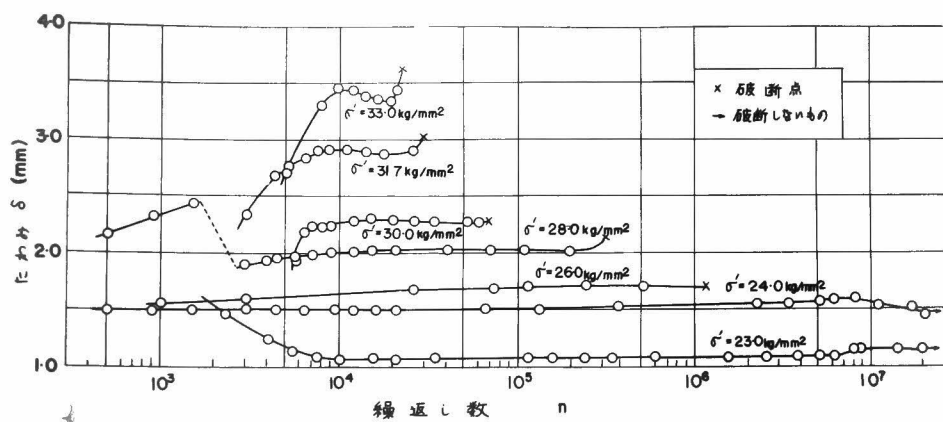
5・6・2 応力二段の結果

応力振幅 $\sigma_1' = 26 \text{ Kg/mm}^2$ ($N_1 = 10^7$) および $\sigma_2' = 30 \text{ Kg/mm}^2$ ($N_2 = 8 \times 10^4$)の二段多重重複繰返し応力の場合の疲れの進行に伴うたわみ変化の例を第151および152図に示した。

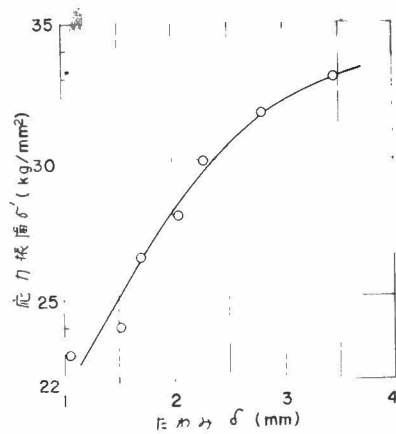
第151図において一点鎖線は第150図の応力一段の応力-たわみ曲線から求めたそれぞれの



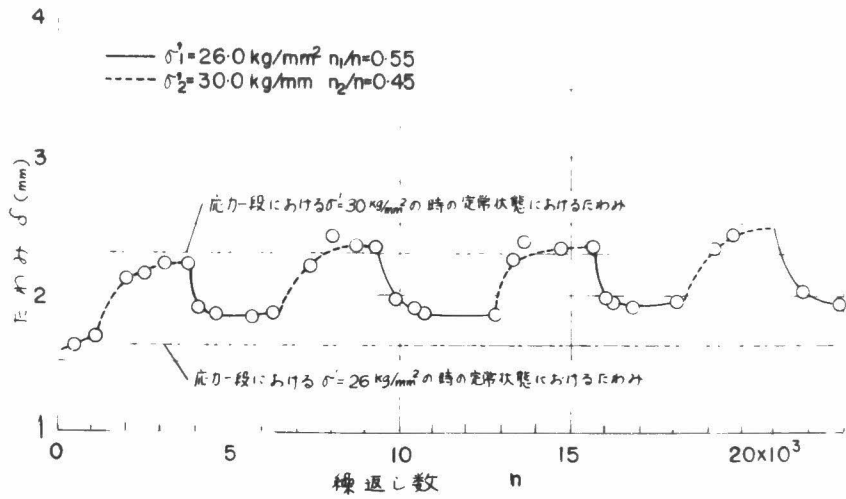
第148図 応力一段の場合のS-N曲線



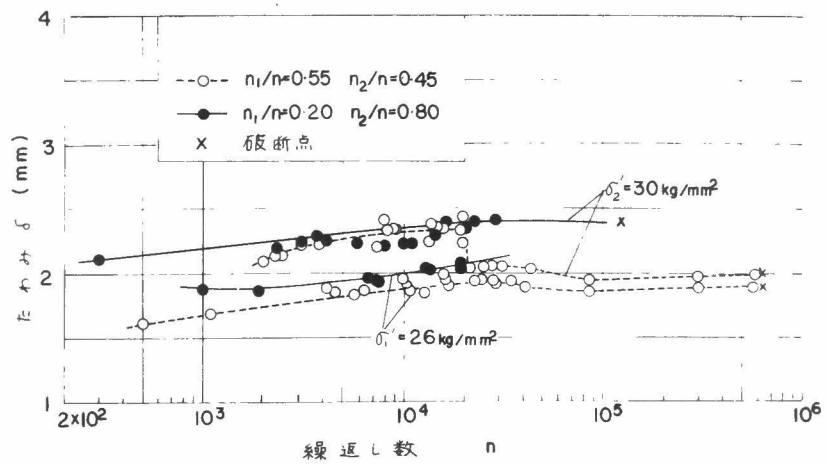
第149図 応力一段の場合のたわみ変化



第150図 応力一段における応力振幅一定常状態におけるたわみ線図



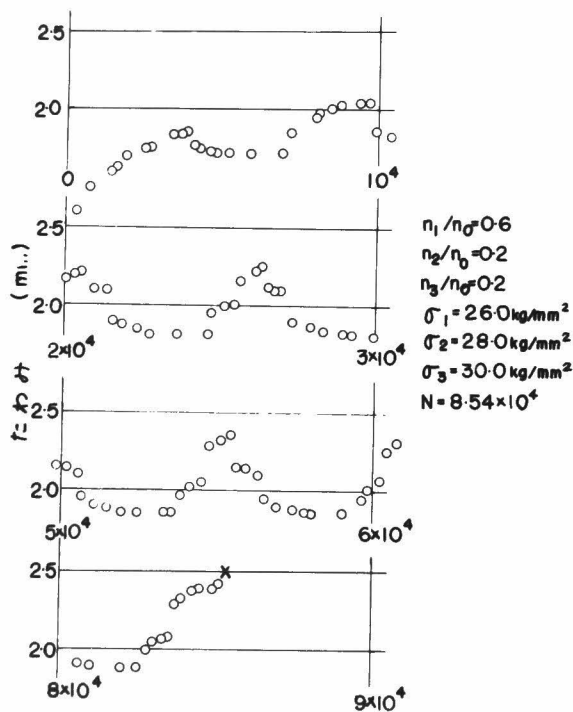
第151図 二段多重の場合のたわみ変化の一例



第152図 二段多重の場合のたわみ変化の一例

応力 σ_1' 、 σ_2' に対するたわみを示したものである。応力切換え後、たわみは徐々に変化しており、第3章において述べた過渡的变化が明らかに現われている。

第152図において白丸の実験点が 2×10^4 の所で大きく変化しておるが、この原因が何であるかはわからない。白丸の $n_1/n = 0.55$ の方が相対的にたわみは小であり、黒丸の $n_1/n = 0.20$ の方が大である。このことは σ_1' 、 σ_2' が互いのたわみをけん制し合っているものと思われ第151図からも容易に想像のつくことである。なお直線被害法則による疲れ寿命に対する比は白丸の場合 $N/N_{th} = 1.28$ 、黒丸の場合、 $N/N_{th} = 0.70$ である。少量の実験結果から定量的な結論を得ることは不可能であるが、応力に対する一つの応答としてのたわみが大きい方が疲れ寿命が短かく



第153図 三段多重の場合におけるたわみ変化の一例

なるという定性的な説明はつくであろう。

5・6・3 応力三段の結果

第153～155図に三段多重重複回転曲げ疲れ試験中のたわみ変化の数例を示した。三段多重の場合の結果も二段多重の場合と同様に応力切換え後、前の応力段階の影響を受けていることは明らかである。三段の場合の結果を簡条書きにすれば次のようになる。

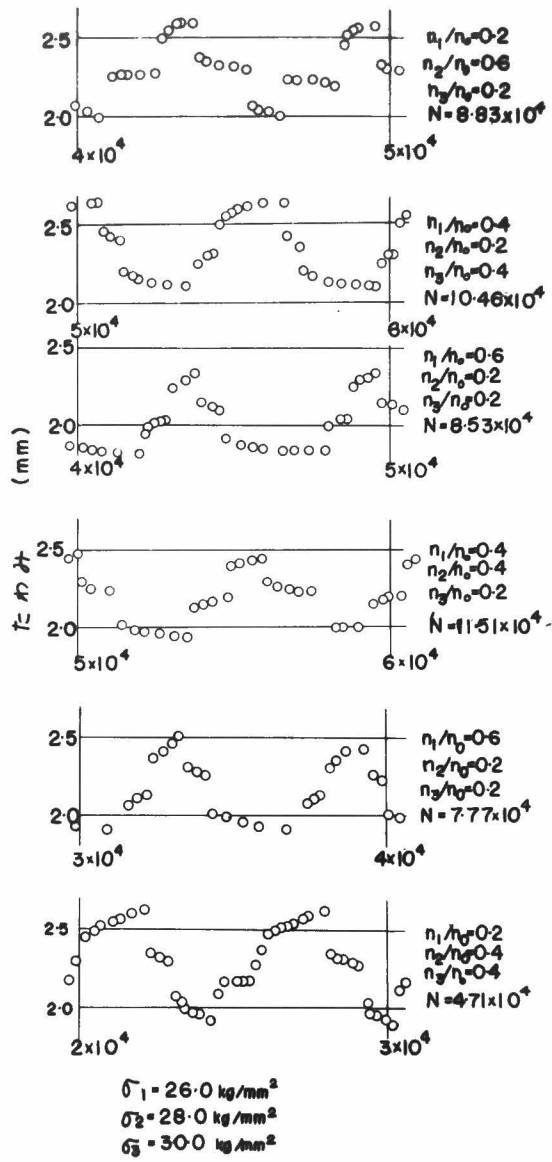
- (1) 今考えている繰返し数における応力の大きさを σ_n としよう。かつ σ_n の直前の応力の大きさを σ_{n-1} とする。 $\sigma_n > \sigma_{n-1}$ ならば σ_n の応力においてたわみは繰返しと共に徐々に増加し一定の飽和値 δ_e に達しようとする。逆に $\sigma_n < \sigma_{n-1}$ ならば σ_n におけるたわみは繰返しと共に徐々に減少し一定の飽和値 δ_s に達しようとする。
- (2) たゞし δ_e と δ_s は必ずしも同じではなく $\delta_s > \delta_e$ の傾向をもつ。
- (3) 各応力レベルにおいて変化するたわみの大きさは全たわみのほゞ10%にも達するが、この値は全寿命を通じて変化しない。
- (4) 疲れ試験の繰返しの始めは 10^4 回においてはたわみは全体的に増加する。また破断直前においてもたわみは増加するが、これはき裂が発生・進行するためである。
- (5) 破断するときの応力レベルは最大応力 σ_3 の場合もあるが、中間応力 σ_2 の場合が多い。かつ σ_2 で破断する場合に、 σ_1 から σ_2 に移って破断する方が、 σ_3 から σ_2 に移ってから破断する場合よりも多いようである。

5・6・4 考 察

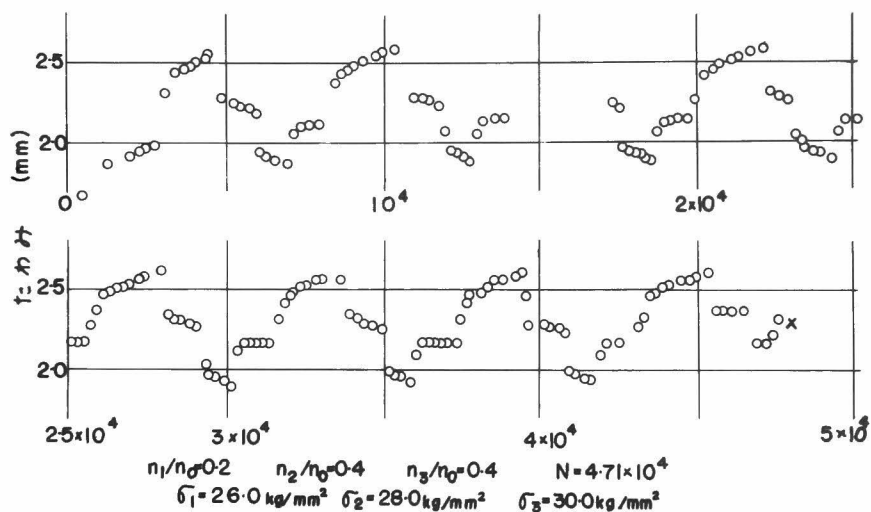
以上の結果よりわかるごとく各応力レベルは次の応力レベルにおけるたわみの変化に影響を与えていることは明らかである。

前項の(2)の結果によれば、たとえば階段荷重で第121図の(C-2)図の如く上昇荷重の繰返しと下降荷重のみの繰返しでは、下降荷重の繰返しの方が相対的に試験片のたわみが大きいことが予想される。かつ試験片のたわみが大きい方が寿命が短いということを考慮に入れば下降荷重のみの繰返しの方が上昇荷重のみの繰返しより疲れ寿命は小さくなるであろうと想像される。この想像はFreudenthalの6段の多重繰返し回転曲げ疲れ試験の結果と一致する。

しかし我々がこゝで注意しなくてはならぬことがある。疲れ強さは組織感受性の性質であり、非常に大きなばらつきを有している。第3章においても述べたごとく、応力と破断までの繰返し数と



第154図 三段多重の場合のたわみ変化の一例



第155図 三段多重の場合のたわみ変化の一例

の関係よりも、負荷応力に対する試験片の応答としての試験片のたわみとかひずみと繰返し数との関係の方が我々が期待する一つの法則性を有しているように思える。しかし応力を一定にして繰返しを与えて応答としてのひずみまたはたわみの変化と破断までの繰返し数との関係は、工業上の要求、換言すれば直接設計資料を与えないということに注意しなければならない。また、本節で述べた、繰返しに伴うたわみの変化は試験片の巨視的な応答であり、試験片に生ずる微視クラックや、材質の局部的変化に関しては何ら言及し得ないということも注意しなければならぬ事柄である。

第150図に示したように応力振幅とたわみ振幅のほぼ安定した値とは一定の応力-たわみ曲線を描いているが、一本の試験片が応力繰返し中に示すたわみ変化は第149図に示したように材料の材質的变化を示すのみで、疲れ破断点を予想できない。引張圧縮の場合、疲れ寿命の50%のところにおける塑性ひずみ ϵ_p と疲れ寿命の関係は $\epsilon_p N^\alpha = C$ なる関係を有していたが(第3章)。

第1章に述べたねじり試験におけるせん断ひずみや本節で述べた回転曲げ試験におけるたわみの塑性部分と疲れ寿命との間にはこのような関係は見いだされない。

次に応力切り換えの際生ずる過渡的なたわみ変化について考えてみる。負荷応力の前段階の応力の影響を受け、過渡的なたわみは、一定の値に近づこうとするが、すでに述べたようにその一定の値は必ずしも応力一段の場合のたわみの値とは異っており、かつ上昇荷重の場合と下降荷重の場合のたわみの一定値は異っている。これらの過渡的なたわみの変化が疲れ寿命に影響を及ぼしているかどうかは今後の大きな研究課題であろう。二段二重重複荷重の際には過渡的な変化が生ずる繰返し数は全寿命の数%内に留まるが、プログラム1サイクルの繰返し数 n_0 が小さくなる多段多重の場合にはすべてのたわみが過渡的なたわみになってしまう可能性がある。またたわみ変化あるいはひずみ変化と疲れ寿命との関係を研究する場合、応力一段の場合の変化を如何に評価するか大きな問題となると思われる。

5・7 結 言

本章においては多段多重重複荷重による疲れ寿命等を研究するために、2, 3の疲れ試験機、装置を試作し実験的研究を行ってきた。得られた結果は次の通りである。

切欠き材の二段多重重複回転曲げ疲れ試験において

- (a) 応力比 σ_A/σ_a 、繰返し数比 n_A/n_0 のいかに拘わらず高応力範囲では N/N_{th} の値は1に近づく。
- (b) n_A/n_0 が小さく、 σ_A/σ_a が大のときは $N/N_{th} < 1$ となる応力範囲が広くなり、このうち低い方の応力 σ_a が処女材の耐久限度付近の値をとるとき、 N/N_{th} の値が最小となる。
- (c) 実験条件の範囲内では σ_A/σ_a の N/N_{th} に及ぼす影響より n_A/n_0 の影響のほうが顕著に現われる。
- (d) 重複荷重を受けたとき、耐久限度はすべて上昇する。
- (e) 平滑材、切欠き材に対して σ_A/σ_a 、 n_A/n_0 の及ぼす影響は定性的にはまったく等しく、定量的には切欠き材のほうが N/N_{th} の値は大きくなる。
- (f) 直線被害法則の式に n_A/n_0 、 σ_A/σ_a 、 σ_A/σ_w' の関数として表わした応力修正係数 k 、 k' を導入し修正した結果、実験値と比較的良く一致した計算値を得ることができた。

平滑材の三段多重重複回転曲げ疲れ試験において

- (a) 上段応力 σ_3 が高応力域 ($\sigma_3 \geq 1.3 \sigma_w'$) では $N > N_{th}$, 低応力域では $N < N_{th}$ となる。
- (b) 上段応力の繰返し数比 n_3/n_0 が小さいほど N/N_{th} の値は小さくなる。
- (c) 上段応力の繰返し数比 n_3/n_0 が同じ場合には, 中段応力の繰返し数比 n_2/n_0 の大きさの影響はあまり認められない。
- (d) 二段多重と三段多重の疲れ寿命の示す傾向にはあまり差は認められないが, 三段多重の場合のほうが N/N_{th} の値は大になる傾向を示した。
- (e) 下段および中段応力値が同じであって, 上段応力の繰返し数比が等しいときは, 破断までの繰返し数の実験値 N と理論値 N_{th} の間には両対数方眼紙上でほぼ直線関係が成立し, 上段および中段応力の繰返し数比が等しいときには平行な直線群が得られた。
- (f) 上段応力の中段応力に対する繰返し数比で実験結果を整理すると, 二段多重の場合の傾向と良く似てくる。

次に二段および三段多重重複繰返し回転曲げ疲れ試験における, 疲れの進行に伴う試験片のたわみ変化の挙動においては,

- (a) 応力一段の場合のたわみ変化は第1章および第3章で述べたねじりや引張圧縮の場合のひずみ変化と同様に材料の性質が変化して必ずしも一定のたわみを示さない。また単に加工硬化, 加工軟化と一義的にも決めることはできない。
- (b) 二段および三段多重の場合, 応力の小さいところから大きい応力に移ったとき, たわみは繰返しと共に増し, 大きい応力から小さい応力に移ったときにはたわみは繰返しとともに減少する。しかしいずれの場合にも応力一段のときのたわみよりも前者では小, 後者の場合には大となる。
- (c) 応力に対する一つの応答としてのたわみが大きい方が疲れ寿命が短くなるという定性的な結果が得られる。
- (d) 応力三段のとき, 破断するときの応力レベルは最大応力 σ_3 の場合もあるが, σ_1 から σ_2 に移ったとき σ_2 で破断する場合が最も多いようである。
- (e) 二段二重の場合(第3章)にも述べたように応力を切り換えたとき過渡的なたわみ変化が多段多重の場合にも生ずる。

才 6 章 実働荷重による疲れ挙動に関する考察

6・1 緒 言

前 2 章において応力波形が疲れ強さに及ぼす影響，多段多重重複荷重と疲れ寿命との関係等について述べてきた。しかし再々述べたように応力履歴が疲れ強さに及ぼす影響は明らかであり，これら応力履歴により応力繰返しによる材料の応答は処女材料が示す応答とは全く異ったものである。今日数多くの研究者が実働荷重の下での疲れ挙動を研究しているが，疲れに関する法則性を見い出せないのはこのためであり，個々のケースについて実験的研究を進めて全体的な傾向を掴むしか方法はないのではないかと考えられる。

本章においては実働荷重による疲れに関する研究を進めるにはどうしたらよいか，という点について今迄述べた研究結果等と併わせて考察する。

6・2 実働荷重による疲れ挙動に関する考察

実働荷重とは実際に機械の部品や構造物に加わる荷重を指すが，同一荷重が規則正しく繰返す場合はほとんどなく，応力振幅が時間と共に変化する場合，あるいは第 4 章に述べたピーク波の如き荷重，あるいは微小振動が大きな応力振幅に重畳している場合等，場合場合によって実働荷重の荷重波形は異っている。東海道新幹線の如く荷重履歴が一日一回ないし二回の割合いで繰返えされる場合もあれば，自動車の車軸に加わる荷重の如く全く任意の荷重履歴が作用する場合もある。したがってもし疲れ破壊の法則性が見い出されなければ最良設計のためには各場合場合の荷重履歴に対する実験を行なって疲れ強さ（無限繰返し数に対する強さあるいは時間強さ）あるいは応力履歴に対する疲れ寿命を評価することが必要であろう。しかしこのことは無限の時間と労力を要する方法であって適切ではない。

又，今日の数多くのランダム荷重による疲れに関する研究の大半は，上述の方法を採用するもので，研究者自身応力頻度・応力履歴を自覚しなくても機械がランダム荷重を試験片に与え，そのラ

ンダム荷重を研究者の欲するピーク法，あるいはレンジ法等に解析してくれる。しかしこのやり方では疲れ挙動の本質を述べ，実働荷重による応力相互間の疲れ寿命に及ぼす干渉を説明することはできないのではないだろうか。

疲れ破壊の真相が十分に明らかにされていない今日，実働荷重による疲れ破壊の現象を理論的に論ずることは殆んど不可能に近いと思われる。しかし破壊にいたる疲れ寿命・繰返し数を予知することは更に数多くの研究によって可能になるのではないだろうか。すなわち実働荷重の応力頻度からプログラム荷重を作り，プログラム荷重と破壊までの繰返し数との関係を詳細に実験的検討を加えることによって，一つの法則性を導びき，実働荷重における破断までの繰返し数を予知することが可能なのではないかと考えられる。その具体的な方法について以下に述べよう。

(1) 応力頻度の仮定

応力頻度は実働荷重においてプログラムを作る基礎となるものだからはっきりと決定しておくことが肝要である。応力頻度の測定は航空機，船舶，鉄道橋，鉄道車輛，自動車，クレーンのように，荷重が一定でなく，その繰返し数も相当大きいものにつき行なわれている。その結果頻度分布には一定の法則性が存在することが見出されており，その分布則は対数正規分布をなしている⁽⁹¹⁾。二段二重重複荷重によって応力の相互干渉等を研究する場合とか，その他基礎的な研究を行なう際には必ずしも上記の対数正規分布にこだわる必要はないのは勿論である。

(2) プログラム荷重疲れ試験の基礎的研究

具体的にプログラム荷重による疲れ試験を行ない，プログラム荷重と疲れ寿命との関係を研究するためには，プログラム荷重が疲れ寿命に影響を及ぼす因子として次のようなものが考えらるが，今までこれらに関して系統的に研究されてきたとは思えない。

(2-a) プログラム1サイクル中の繰返し数

プログラム1サイクル中の繰返し数 n_0 を無限にとれば応力一段あるいは二段二重重複荷重の疲れ試験に相当し，また n_0 を微小にすればその極限は第4章に示したような応力波形による疲れ試験に相当する。これら二つの結果に差があることは明らかであり， n_0 の大きさが疲れ寿命に影響を及ぼしていることは明らかである。したがってプログラム1サイクル中の繰返し数 n_0 が疲れ寿命に及ぼす影響を明らかにすれば，プログラム荷重を設計することが容易になり，また試験片の破壊までに必要と思われるプログラムのサイクル数も明らかとなるであろう。

(2-b) 応力段数

応力頻度曲線からプログラム荷重を作る場合、応力段数を無限にとれば実働荷重そのものにも、
又いわゆる変動応力にもできる。しかしプログラム荷重で多段多重重複荷重をプログラムするとき
には応力段数をあまりにも数多くすることは装置の複雑化を招くばかりである。応力段数を順次増
減した場合、段数が疲れ寿命に及ぼす影響を明らかにしておくことも実働荷重による疲れ挙動を研
究する際に大切な事柄である。

(2-c) 応力の順序

こゝにいう応力の順序とは第121図の(c)図に示したようにプログラム荷重1サイクル中の応力
の各レベルが順次如何に変化するかを指す。第5章の考察においても述べたごとく、第121図の
(c-3)図と(c-4)図の応力順序では疲れ寿命に及ぼす影響には差があり、これが(c-4)
図の如く任意の順序になっているときとの関係を明らかにして応力レベルの相互干渉を求めること
も大切な事柄であろう。二段二重の場合には一次応力が二次応力より小であれば、コーキング効
果により N/N_{th} の値は1より大きくなることがほゞあらゆる疲れ試験において類似した結果とな
っている。しかし通常行なわれている多段多重重複荷重の疲れ試験においては実験施行上の容易さ
より、第121(c-1)図の形の応力順序がとられており、応力の順序の影響についての系統的
検討はなされていないようである。

(2-d) 初期応力の大きさ

試験片に疲れき裂が生ずるのは繰返し数のほゞ10%内外であることは、すでに多くの研究者が
認めていることである。したがって、プログラム荷重においても初期荷重が疲れき裂の発生および
伝播に及ぼす影響は大きいと考えられる。

(2-e) ピーク荷重のごとく小繰返し数大応力

静破断強度の70~80%にも相当する大応力がプログラム1サイクル中に1, 2回作用する場
合、この大応力が疲れ強さに及ぼす影響は重大である。たとえば初期応力としてこの大応力が作用
すれば、(a)材料の加工硬化を大にし疲れ強さを上げる、(b)材料に塑性流れを生じ、材料を異方性
にして疲れ強さを弱める、(c)圧縮残留応力を生じ材料の疲れ強さを上げる、等々の影響が考えられる。
また微小き裂が生じた後にこの大応力が作用すれば、(a)すでに生じているき裂を拡大するのに効果
がある、(b)たとえき裂が大応力によって拡大しても、き裂先端に大きな塑性流動が生じて加工硬化

作用を大ならしめ疲れ強さを上昇する、とも考えられる。

(3) プログラム荷重疲れ試験結果の評価

上述の基礎的研究に挙げた因子が及ぼす影響は勿論、材料の種類、引張圧縮・回転曲げ・ねじり等の応力の種類、応力レベルあるいは実験する疲れ寿命の大きさ等によって異なってくることが予想される。したがってプログラム荷重の下での疲れ試験結果を、実働荷重の下での疲れ寿命推定の基準とするためには、プログラム荷重による疲れ試験結果を正當に評価することが必要である。その評価の方法として

(3-a) プログラム荷重の下における等価耐久限度、および等価時間強度の決定

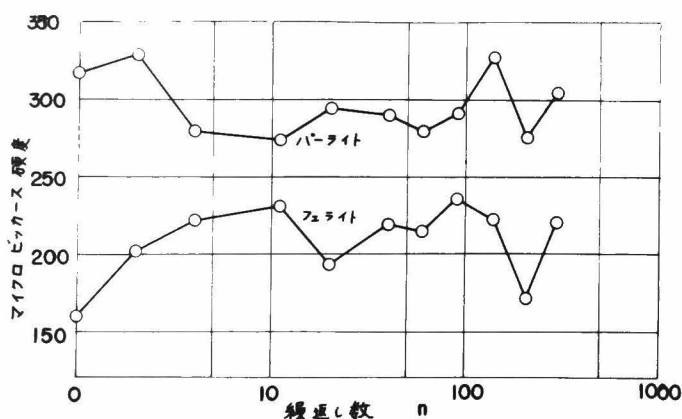
(3-b) プログラム荷重の下における等価耐久繰返し数の決定

(3-c) 組み合わせ応力、表面処理、形状等への適用が可能かどうかの評価

が挙げられる。また研究を実施する場合、最小の経費と最短の時間で効果的な研究成果を挙げる必要がある。上記の等価耐久限度あるいは等価耐久繰返し数を決定するということは重複荷重の場合の疲れ被害の評価に同等のことであるが、疲れ被害度に対応するものを見い出すことがまた必要な事象である。第1, 2, 3および5章において述べた、疲れの進行に伴う試験片の変形（ひずみ、たわみ）の変化は疲れ被害の進行の一つの目安になるものである。ひずみの変化は今までも述べたように試験片に現われる疲れ被害の平均化された値と考えることができる。この他に局所的なX線解析、硬さの変化、電子顕微鏡的さり線、塑性領域の拡大、結晶のポリゴニゼーションの発達、等と疲れの進行とを総合的に研究することによって疲れ被害の進行を考察できるものとする。

第156図に定ねじれ角試験における低繰返し数でのビッカース硬さの変化の一例を示した。これは第3図に示した応力振幅の変化を測定した試験と同一条件の下で行なったものである。フェライト部は繰返し数と共に徐々に硬さは上昇、パーライト部は逆に減少する傾向を示している。第3図において繰返し数の増加と共に、この繰返し数範囲内では、応力振幅は減少し加工軟化の減少を示した。しかし、こゝにおいて注意すべき事柄は、硬さを測定するために試験片を試験機から取り外したりする場合、そこには時間の経過があり、いわゆる休止の影響が入っており、応力振幅の変化は第3図に示したような円滑な変化曲線は描かないということである。

したがってあらゆる事象を総合的に研究するといっても、自ずからそこには制約があり、あたかもHeisenbergの不確定性原理に似た法則が作用していると考えなければならない。



第156図 定ひずみ試験における低繰返し数での硬度の変化の一例

第3章において特に強調したごとく、プログラム荷重あるいは実働荷重において、応力繰返しに対する応答としてのひずみあるいはたわみの変化は処女材のそれとは全く異なったものになっている。したがって実働荷重の下での疲れ挙動を考える場合、応力一段の疲れ現象が実働荷重の下での疲れ現象の基礎的なものとして考えるやり方——たとえば直線被害法則はその一つである——は疲れの本質に近づかないのではないだろうか。それよりも、実働荷重の中の特殊な場合として応力一段の疲れ現象を考える方が意義があるものと思う。

次に前章までの実験結果においてもしばしば指摘したごとく、疲れ強さと材料の降伏点との間には関係があることが予想される。しかし、繰返しを受けた材料の静的強度が処女材のそれとは異ったものであり、疲れ強さと降伏点とが本質的な関係をもつものではなく、巨視的な関係として捕えるべき性質のものであろう。実働荷重における疲れ挙動を考察する場合、疲れ強さと降伏点との間の定性的関係を明らかにすることも疲れ破壊の法則性を見出すために大切な事柄である。三段多重重複疲れ試験において示したように、下段および中段荷重の応力の大きさが処女材の降伏点や耐久限度に等しいとき、 N/N_{th} の値が一つの極値をもつことが明らかであるが、実験資料が不充分

なため未だ法則性を見い出すには致らなかった。

しかし時間強度と耐久限度とはまた別の機構によってその法則性を見い出さねばならないようである。というのは耐久限度は試験片の破断しない応力の限界であるから一定応力振幅による耐久限度と実験条件とによって関係づけられる。一方時間強度は材料の破断強度であって、処女材の耐久限度、降伏点や実験条件によって関係づけることができよう。しかし破断する強度であるから、処女材の耐久限度は時間強度を求めるためには単にパラメータ的な意味をもつに過ぎないと考えるべきであろう。

第3部 長方形断面のねじり疲れ強さおよび 金属結晶の薄箔中に存在する単一転 位周辺の応力分布に関する研究

第7章 長方形および円形断面のねじり疲れ強さに関する研究

7・1 総 言

円形断面以外の断面形状が静的強度や疲れ強さに及ぼす影響に関しては、容易に応力分布の計算
ができる引張り、圧縮、曲げの試験においては計算のみにても強度をある程度推定で きるであろう。

しかしねじり試験においてはかなり複雑な計算をしなければ断面内の応力分布を求めることができ
ない。また形状によっては計算不可能な場合も存在する。また一般に円形断面以外の形状をもつ断
面は工作が容易でないため、応力計算のための理論解析は多く行なわれているが、疲れ試験はもと
より静的強度を求めるねじり試験も今までに行なわれていないようである。

疲れ強さが試験片を完全弾性体と考えて求めた表面の最大応力のみによって定まるものとすれば、
断面の形状によ って疲れ強さに差は生じないが、実際には試験片が繰返し荷重を受ける際に試験片
の一部では塑性ひずみを生じており、また断面形状により応力分布や応力勾配が異なっているため、
試験片に生じた微小き裂の伝播速度あるいはき裂発生の可能性のある領域等が断面形状によって異
なるため疲れ強さが異なるであろうということが想像される。

(74)

河本・西岡は表面の塑性変形を生ずる応力域を計算し種々の断面形状の平面曲げ疲れ強さの比較
を行なっている。その結果は第22表に示すように断面内で最大応力部分が占める面積の割合が大
きいI形ビーム、中空円形断面などの疲れ強さは中実円形、十字形断面の疲れ強さに比較して弱く
なっている。このことは疲れ強さは最も大きい応力のみによって定まるものではなく断面の形状に
よって変化することを示している。またKugelも断面内での高応力部分の体積を考慮して切欠き

(75)

材の疲れ強さを求める計算をしているが、この方法は切欠き材に限られるという欠点がある。

第22表 断面形状と平面曲げ耐久限度

断 面 形 状	耐久限度 Kg/mm^2	長方形断面に対する比	
		実 験	計算値
長 方 形	19.8	1.00	1.00
円 形	20.4	1.03	1.03
I 形	18.7	0.94	0.97
十 字 形	20.0	1.01	1.04
中 空 円 形	19.7	0.99	0.99

ねじりの場合には断面の形状によって応力分布が引張り、曲げ応力の場合とは異なった特有の分布を示すことが知られているので、断面の形状によってねじり疲れ強さは大きく変化することが予想される。

たとえば長方形断面にねじり応力を与えた場合、長辺の中央に最大せん断応力が生じ、各辺の角では応力は零になる。したがって、もし疲れき裂が最大応力の点で発生すると仮定すれば、それから後のき裂は如何に伝播するか、また断面が異なるためにき裂発生までの繰返し数および破断までの繰返し数は如何なる影響を受けるであろうか。

このような意味で本章においては円形および長方形断面のねじり疲れ試験を行なったのでその結果について述べる。

7・2 試験方法

供試材料は0.44%炭素鋼で810°C1時間加熱後炉内冷却したものを機械加工した。その化学成分を第23表に機械的性質を第24表に示した。

本研究で実験した試験片の形状は円形断面、および3種類の長方形断面でその寸法および形状を

第23表 供試材の化学成分 (%)

C	Si	Mn	S	P
0.44	0.21	0.68	0.026	0.033

第24表 供試材の機械的性質

σ_{so} (Kg/mm ²)	σ_{su} (Kg/mm ²)	σ_B (Kg/mm ²)	σ_T (Kg/mm ²)	ϕ (%)	ψ (%)
29.0	27.5	62.3	84.7	20.8	44.6

第157図に示した。これら長方形断面の寸法は次のようにして定めた。今長方形断面の長辺の長さを a 、短辺の長さを b とおく。第158図において、長辺の中央Aにおいて最大応力 τ_1 が生じ、短辺の中央Bにおける応力 τ_2 は応力の一つの極大値を示し、各辺の交点である4隅Cにおける応力 τ_3 は零となる。さて円形断面におけるねじりモーメント T と最大応力 τ の関係は、試験片の直径を d とおくと、

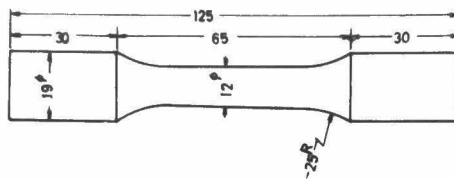
$$\tau_0 = \frac{16 T}{\pi d^3} \quad (29)$$

である。また長方形断面におけるねじりモーメント T と最大ねじり応力 τ_1 の関係は

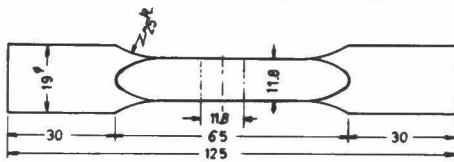
$$\tau_1 = \frac{T}{k_1 a b^2} \quad (30)$$

である。ただし k_1 はSaint Venantによって求められた係数で a/b の比により定まる定数である。長方形断面の寸法は円形断面の試験片と同じ T/τ の値を得るようにして定めたものである。

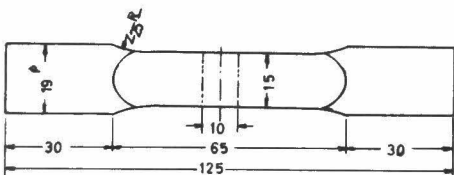
a/b の値を1.0、1.5および2.0の3種類の長方形について実験を行なった。実際には長方形



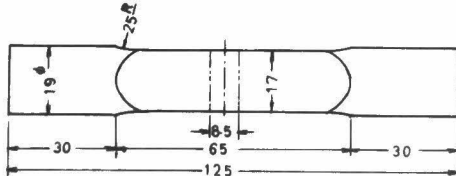
(a) 試験片型Ⅰ 円形断面 (12φ)



(b) 試験片型Ⅱ 長方形断面 (11.8×11.8)



(c) 試験片型Ⅲ 長方形断面 (10×15)

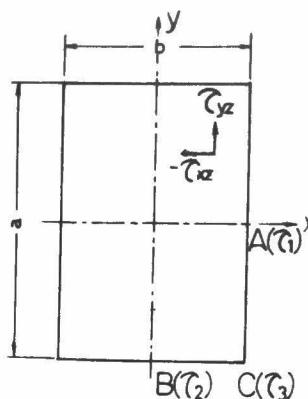


(d) 試験片型Ⅳ 長方形断面 (8.5×17)

第157図 試験片形状および寸法

断面の試験片の各辺の寸法は試験片握み部との関係や工作上の都合から簡単な数字にされたため T/t の値は第25表に示すような値になった。なお同表には参考のため各試験片断面形状に対する θ/t , θ/T の値をも示した。

使用した試験機はUpton-Lewis 繰返しねじり試験機で、繰返し速度は毎分100回である。また静試験に使用した試験機は島津電子管式50Kg-mねじり試験機である。



第158図 長方形断面

次に試験片断面内の応力分布について考
えよう。円形断面では、周辺の応力を τ_0 、
直径を d とおくと、半径 r の任意の点での
応力 τ は

$$\tau = \frac{2r}{d} \tau_0 \quad (31)$$

となる。長方形断面では、第158図に示
すような τ_{xz} 、 τ_{yz} の2種類のせん断応
力成分が存在する。 $x = \pm b/2$ において
は $\tau_{xz} = 0$ 、また $y = \pm a/2$ においては
 $\tau_{yz} = 0$ であり、かつ各点における合成
せん断応力は

$$\tau = \sqrt{\tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2} \quad (32)$$

第25表 各試験片断面の寸法

試験 片形	形 状	直 径 d (mm)	辺 比 a/b	長 辺 a (mm)	短 辺 b (mm)	断面積 (mm^2)	T/τ (mm^3)	$(\theta/T) G$	$(\theta/T) G$ $\times 10^{-4}$
I	円 形	12	—	—	—	113.1	339.3	0.1667	4.912
II	正方形	—	1.0	11.8	11.8	139.2	342.1	0.1496	3.668
III	長方形	—	1.5	15.0	10.0	150.0	346.5	0.1180	3.405
IV	長方形	—	2.0	17.0	8.5	144.5	302.0	0.1265	3.841

である。Saint Venant の方法⁽¹⁷⁾によって応力成分は次の式で与えられる。

$$\tau_{xz} = -\frac{8G\omega b}{\pi^2} \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{(-1)^\nu}{(2\nu+1)^2} \cdot \frac{\sinh \frac{(2\nu+1)\pi y}{b}}{\cosh \frac{(2\nu+1)\pi a}{2b}} \cos \frac{(2\nu+1)\pi x}{b} \quad (33)$$

$$\tau_{yz} = G\omega \left[2x - \frac{8b}{\pi^2} \cdot \frac{a}{b} \cdot \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{(-1)^\nu}{(2\nu+1)^2} \cdot \frac{\cosh \frac{(2\nu+1)\pi y}{b}}{\cosh \frac{(2\nu+1)\pi a}{2b}} \sin \frac{(2\nu+1)\pi x}{b} \right]$$

(33) 式における級数は収束性が早いので、計算の都合上第一項のみをとり、第二項以下を省略すると、

$$\tau_{xz} = -\frac{8G\omega b}{\pi^2} \cdot \frac{\sinh \frac{\pi y}{b}}{\cosh \frac{\pi a}{2b}} \cos \frac{\pi x}{b} \quad (34)$$

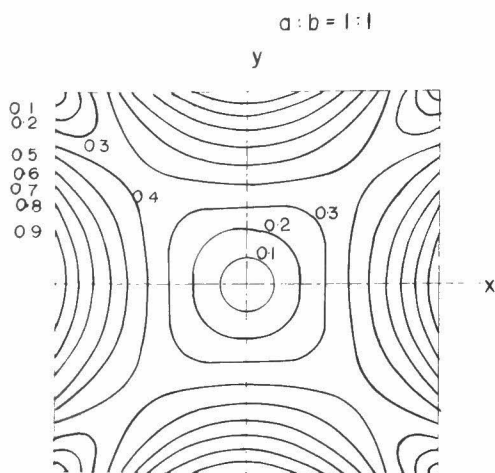
$$\tau_{yz} = \frac{8G\omega b}{\pi^2} \cdot \frac{a}{b} \cdot \frac{\sinh \frac{\pi x}{a}}{\cosh \frac{\pi b}{2a}} \cos \frac{\pi y}{a}$$

となる。この値を数値計数し $\sqrt{\tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2}$ を求め長辺の中央の応力に対する比で表わしたものを第159～161図に示した。これらの図は各断面内での等応力線を示している。(33)式で第二項以降を省略したことによる誤差は短辺の中央で比較して第26表のごとくなる。

7・3 試験結果

7・3・1 静ねじり試験結果の比較

4種類の形状の第157図に示した試験片の静ねじり試験によるねじり降伏点、ねじり強さおよび試験片のねじれ角の比較を第27表および第162および163図に示した。これらの結果より



第159図 等応力線図 ($a : b = 1 : 1$)

第26表 短辺中央での応力値

a/b	(7.5) 式で 求めた応力	(7.6) 式で 求めた応力	(7.6) 式による 誤差 (%)
1.0	1.000	1.000	0
1.5	0.859	0.843	-1.9
2.0	0.795	0.758	-4.7

円形断面の試験片では静的強度は一番低い、一番延性に富んでいるといえる。

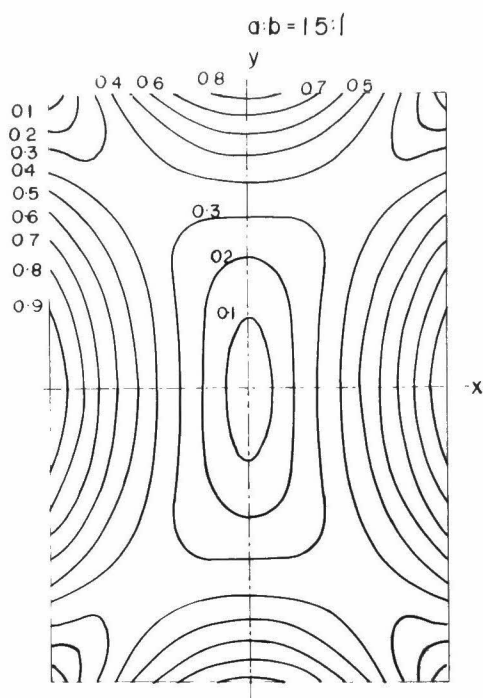
長方形断面の試験片では変形が周囲の応力の低い部分で拘束されるため、負荷し得る最大応力は高くなるが、試験片のねじれ角は円形断面のそれに比して小さくなっている。降伏応力も円形断面が最小であるが、ねじり強さほど著しい差はなく、それ以上のモーメントに対する塑性変形による降伏域の増加が形状によって拘束されていることを示す。

7・3・2 疲れ試験

結果

試験機の回転速度が毎分100回という低速のため、疲れ試験は破断までの繰返し数 $10^4 \sim 10^6$ の範囲でしか行なえなかった。

第164図に4種類の試験片の疲れ試験結果を示した。縦軸は試験片断面の弾性的に求めた最大応力（円



第160図 等応力線図 (a : b = 1.5 : 1)

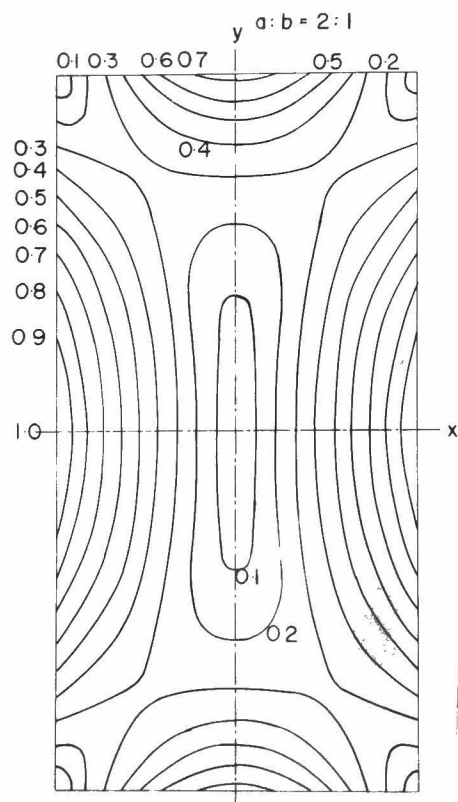
第27表 静ねじり試験結果

試験片 断面	τ_s (Kg/cm^2)	τ_B (Kg/cm^2)	θ (注) (度)
I (円形)	20.0	48.3	343
II (正方形)	22.0	76.3	312
III (長方形)	26.5	88.3	324
IV (長方形)	25.2	88.0	259

(注) 破断時のねじれ角

形断面では円周上，長方形断面では長辺の中央での応力)である。応力の大きさによって疲れ寿命の試験片形状による順序は変わってくるが，破断までの繰返し数 $N=10^6$ における時間強度 σ_w ($N=10^6$)の順序はねじり降伏点およびねじり強さの順序と同じである。第165図にねじり降伏点と σ_w ($N=10^6$)との比較図を示した。図にみるごとくねじり降伏点ほど大きな断面形状による差は見られないが， $N=10^6$ における時間強度も試験片Ⅲ型が最も大で，円形断面のⅠ型の疲れ強さが最も小さい。第165図の結果よりいえる事柄は長寿命の疲れ強さは降伏点とは×同じ機械的極限によって定まるものと考えられる。

第166～169図に示したものは試験片表面に発生する疲れき裂を発見した繰返し数と破断までの繰返し数である。白丸は破断までの繰返し



第161図 等応力線図 ($a:b=2:1$)

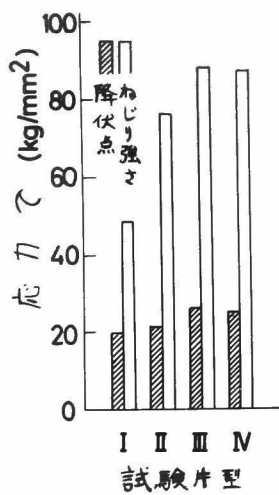
で発見された。これに比し、長方形断面の試験片では軸方向き裂の発生する時期は円形断面のそれより遅く、軸と交差する方向のき裂発生は円形断面のそれより早くなっている。

以上の結果より、試験片の断面の形状によって、疲れき裂が発生する時期、またき裂の伝播する速度が変化することが明らかである。

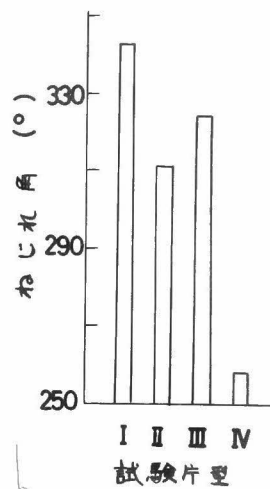
第171図は軸方向のき裂が発生する繰返し数と応力の関係を示したものである。円形断面の結果は他の3種類の結果に比較して弱い、3種類の長方形断面の軸方向のき裂発生繰返し数の間に

数、黒丸は試験片の軸方向のき裂発生繰返し数、半黒丸は軸と交差する方向のき裂発生繰返し数を示す。繰返し応力が大きいときき裂はいずれの試験片断面形状においても試験片最大せん断応力方向（軸方向）の細かいき裂がまず発生し、その両端においては 45° の方向のき裂に拡大している。

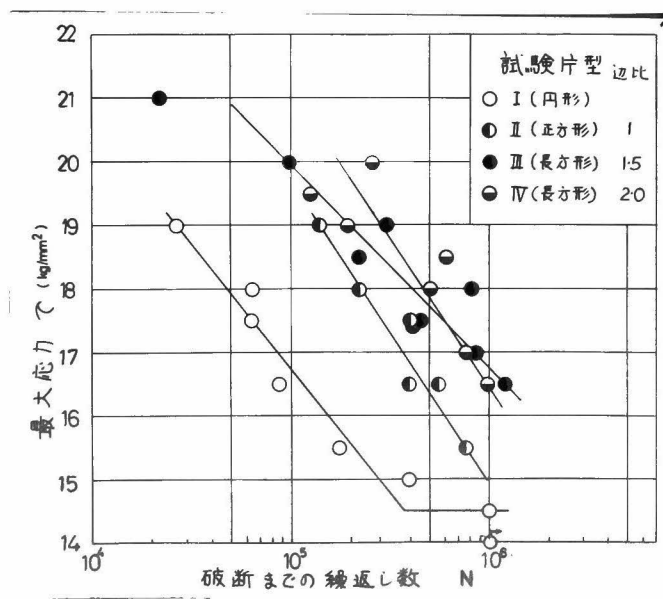
断面の形状によって疲れき裂が現われる繰返し数が変化する。その様子を第170図に示した。縦軸はき裂発生繰返し数と破断までの繰返し数との比で、各断面形状の全試験片の平均の値を示している。円形断面では繰返し数が全寿命の15%のときに軸方向のき裂が生じ、これに交差するき裂は全寿命の約90%の所



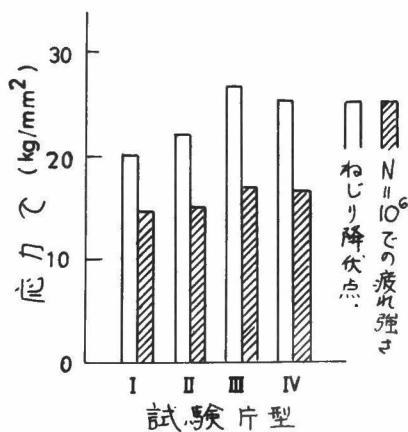
第162図 ねじり強さの比較



第163図 ねじれ角の比較



第164図 S-N 曲線の比較



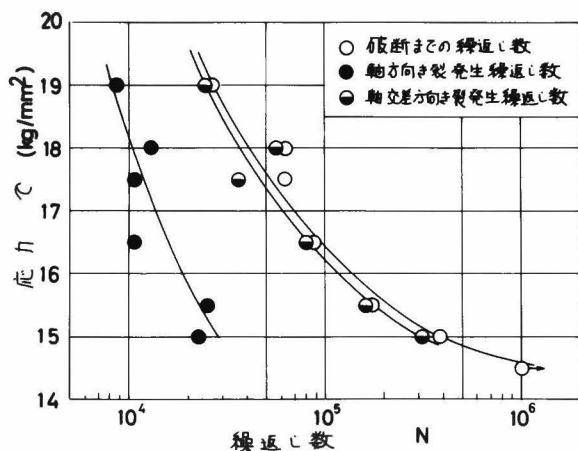
第165図 ねじり降伏点と疲れ強さとの比較

差は見られずほぼ同じである。

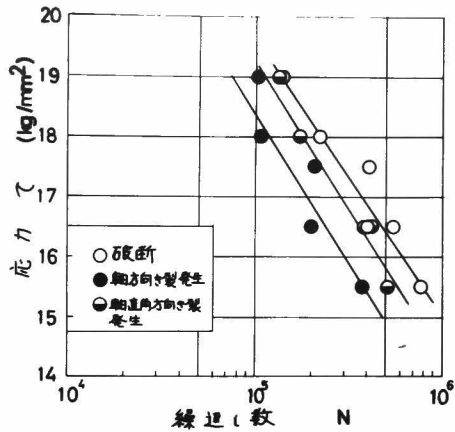
このことより長方形断面では
疲れき裂発生繰返し数は刃
比に関係なく一定で、き裂伝
播速度が異なっているために、
破断までの繰返し数が変化する
ものと考えられる。

7・3・3 試験結果の 考察

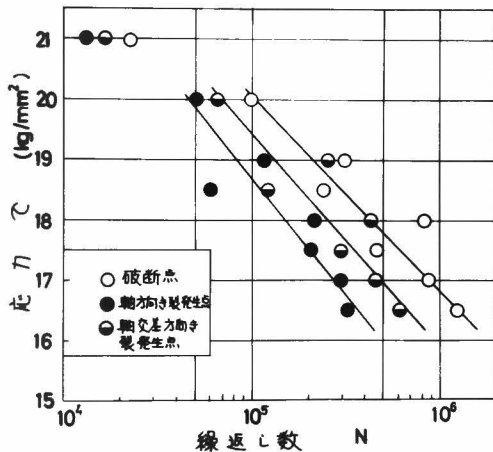
以上述べた静試験および疲
れ試験の結果を要約すれば次
のようになる。ねじり降伏点、
ねじり強さおよび長寿命の疲



第166図 円形断面の疲れき裂発生繰返し数



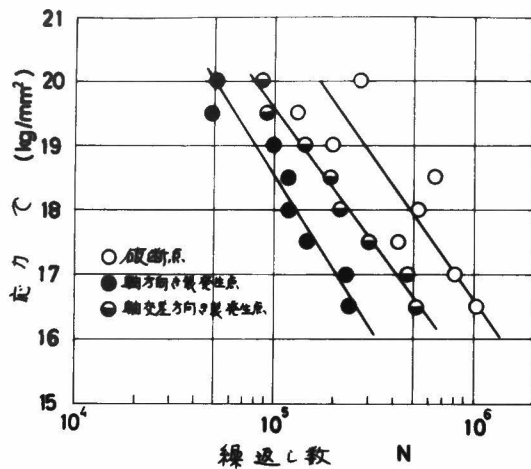
第167図 試験片Ⅱ型（正方形断面）のき裂発生繰返し数



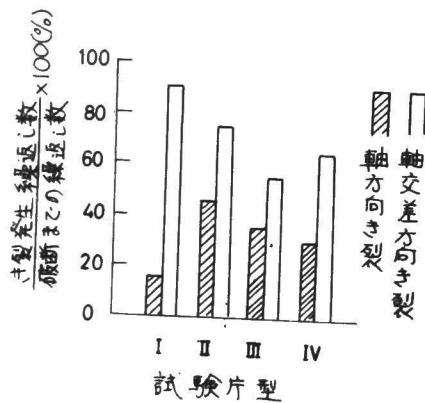
第168図 試験片Ⅲ型（長方形断面）のき裂発生繰返し数

れ強さは、試験片Ⅲ，Ⅱ，Ⅳ，Ⅰの順に小さくなっていく。疲れき裂が発生する繰返し数の破断までの繰返し数に対する比は断面の形状によって異なるが、3種類の長方形断面の試験片では疲れき裂発生までの繰返し数には辺比による差は認められない。

すなわち円形断面と長方形断面の間では明らかに疲れ強さ、疲れき裂発生までの繰返し数に差があるが、長方形断面では辺比による差はき裂伝播速度のみであるといえる。第172図に、試験片断面内の最大応力に対する応力比 σ/σ_{\max} を横軸にとり σ/σ_{\max} 以上の応力を占める面積比を縦軸にとって面積比-応力比曲線を示した。応力比が大なるところでは3種類の長方形断面の面



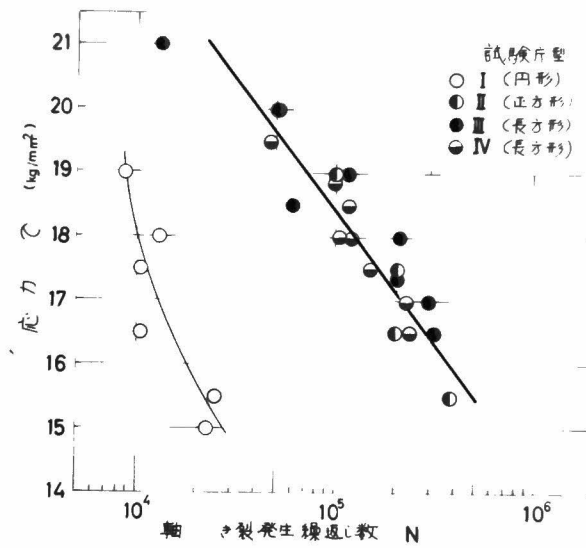
第169図 試験片Ⅳ型（長方形断面）のき裂発生繰返し数



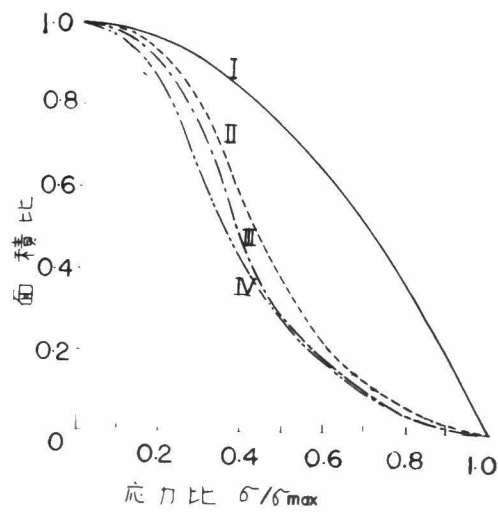
第170図 き裂発生繰返し数比の比較

積比には大差ない。 $\sigma / \sigma_{\max} = 0.9$ での円形断面の面積比に対する長方形断面の面積比の比はほぼ1.0である。一方第171図に示した軸方向き裂発生繰返し数は円形断面のほうが長方形断面のその約1/10の1になっている。

したがって長方形断面の疲れき裂発生までの繰返し数は、最大応力に対する応力比がほぼ0.9以上の面積比に反比例して、円形断面での疲れき裂発生までの繰返し数よりも大きくなっていると考えられる。かつき裂発生以後破断までの繰返し数は各断面のき裂伝播速度に依存するものと考えられる。本研究においてはき裂伝播に関して十分な観察を行っていないので、各断面についてこれ以上の考察はできない。



第171図 軸方向き裂発生繰返し数の比較



第172図 面積比-応力比曲線

7・4 結 言

本章においては0.44% C炭素鋼を用いて円形および3種類の長方形断面の試験片のねじり疲れ試験を行ない疲れ強さの比較を行なった。得られた結果は次のとおりである。

- (1) 静ねじり試験で、降伏点、ねじり強さは円形断面が一番弱く、正方形断面・長方形断面の順に強くなっており、 $N=10^6$ での時間強度も静的強度の順に高くなっている。
- (2) 疲れき裂が発生する繰返し数の破断までの繰返し数に対する比は断面の形状によって異なるが、3種類の長方形断面の試験片では疲れき裂発生までの繰返し数には辺比による差は認められない。
- (3) 長方形断面の疲れき裂発生までの繰返し数は、最大応力に対する応力比がほぼ0.9以上の面積比に反比例して、円形断面での疲れき裂発生までの繰返し数よりも大きくなっていると考えられる。
- (4) 軸と交差する方向のき裂発生繰返し数の破断までの繰返し数に対する比の大きさの断面による順序は、降伏点や時間強度の順序とは逆になっている。
- (5) したがって直方形断面での破断までの繰返し数は、き裂発生までの繰返し数よりも、き裂伝播速度に依存すると言える。

第8章 薄箔結晶中に存在する単一らせん転位周辺の応力分布

8・1 緒言

結晶内の γ が転位の移動によって生ずるという考えは最初Taylor⁽⁷⁹⁾によって提唱された。

γ は γ 面のある場所に生じ、ある速度をもって γ 面上を γ がっていくと一般に考えられている。 γ った部分の境界は γ 転位と呼ばれ、また γ 転位を示す線は転位ループと呼ばれている。この転位ループは必ず閉じた曲線を描くかあるいは材料の自由表面につながっている。

γ 転位は等方性の弾性連続体の変形として表わすことができる。⁽⁷⁹⁾すなわち材料の γ 面に沿って材料の一部を切断し、その切断された部分の面を相対的に距離 b (Burgers ベクトル) だけ γ り方向に移動させる。この切断部分と非切断部分の境を転位と呼ぶ。Burgers⁽⁸⁰⁾は上述のような転位によって生じた静的な変位が転位ループ (上述のように γ った面積を囲む線) に沿う積分によって表わされることを示している。⁽⁸¹⁾Nabarro は γ った面内での二重積分を行なって同様の一般的結果を導びき、運動中の転位によって生ずる瞬間的な変位を求める方法を導いている。またMura⁽⁸²⁾はさらに一般的な方法で転位ループに沿う線積分を行なって同様の結果を得、一様に分布する運動中の転位の応力場、変位の場を求めるのに成功している。

静止転位、一様速度で運動中の転位および振動しているらせん転位に対する応力場、変位の場はそれぞれBurgers⁽⁸⁰⁾、Frank⁽⁸³⁾およびEshelby⁽⁸⁴⁾によって求められているが、Muraの方法による結果はこれらの結果と一致しており、より一般的な方法と言えるだろう。

以上は転位による応力場の計算方法に関する研究の概説であるが、等方性の無限物体を仮定している。また計算方法としては転位ループに関して積分する形になっているが、転位ループが直線とか円のように簡単な形でないと計算は大変複雑になり、實際上応力場、変位の場を計算することは不可能である。

したがって転位論を金属材料の疲れの現象に適用しようとする場合、定性的に転位が如何に動い

て intrusion, extrusion が発生するか、また微視的き裂の発生の機構を説明するに止まり、定量的に転位による応力の場を計算したり、疲れの進行に伴う転位の移動速度を論ずることはされていない。これは実用金属は多結晶材であり、材料が無限物体ではないこと、また転位密度が $10^4 \sim 10^6$ のオーダーで表わされるように非常に数多くの転位があるため、転位相互の干渉があり、これを定量的に扱うことに成功していないこと等によるものと考えられる。そのため微小き裂⁽⁸⁵⁾ 発生の機構に関する転位論的仮説が数多く提唱されているがこれといった決め手がないのが現状である。したがって今後多結晶中の転位の運動と強度との関連に関する研究がなされるものと予想される。

さて金属材料の疲れへの応用をも含めて今日注目を惹いている転位の実験は Gilman⁽⁸⁶⁾ による。彼の実験材料は LiF であるが、せん断応力 0.7 Kg/mm^2 で転位が動き始め塑性変形を生ずる。クリープひずみ、繰返し速度による疲れ強さの変化の研究に適用できるものと思われるが、こゝでは本論と離れるので Gilman の研究に関しては省略する。

本章で扱う問題は題に示したように薄箔結晶中に存在する単一らせん転位の周囲の転位応力分布の計算方法および計算結果である。上述の静止あるいは運動中の転位による応力として求められたものは無限物体を仮定しこの中に存在する転位の周辺の応力である。しかるに今日転位の動き等を観測するために 10^{-4} mm のオーダーの薄箔を使用することが多くなっている。このように薄くなった場合、従来の無限物体と仮定して計算した応力分布がそのまま使用できるかどうかを検討するのが目的である。なお仮定した転位は箔の面に垂直に存在する場合であるが、実際にはこのような形で転位が存在することは稀であろう。今後さらに研究されることが望まれる。

⁽⁸²⁾
計算の基礎式としては Mura の方法を採用した。第 8・2 節においてはその基礎式を導びく方法について述べる。順次、薄箔における応力分布の計算および計算結果について述べることにする。

8・2 計算の基礎式の導入

緒言において述べたごとく、本節においては Mura によって導びかれた転位による応力の場、変位の場を求める一般的方法について述べることにしよう。

最初に速度 V で運動している一個の転位について考えよう。負荷応力（外力による応力）を

$\tau_{ij}(x, t)$ 、および転位応力（転位によって生ずる応力）を $\sigma_{ij}(x, t)$ とする。負荷応力を与えて転位の経路を弾性論のみで求めることは不可能である。しかし転位の径路を時間の関数として与えることにすれば、変位、ひずみ、応力の時間履歴を弾性論のみで得ることができる。今考えるべき領域をDとおくと、領域D内において運動方程式は

$$\sigma_{ij,j}(x, t) + \tau_{ij,j}(x, t) = \rho \ddot{U}_i(x, t) \quad (35)$$

で与えられる。⁽⁸⁹⁾ 記号、 j および \cdot は座標の x_j および時間 t による微分を表わす。また U_i は i 方向の変形、 ρ は材料の密度を表わす。 ρ は一定と仮定する。() 内の変数 X は座標が (x_1, x_2, x_3) である点を代表するものとし、必要がなければ $\sigma_{ij,j}(x, t) = \sigma_{ij,j}(x, t)$ を省略する。

弾性係数 $C_{ijk\ell}$ を含む Hook の法則は

$$\sigma_{ij} + \tau_{ij} = C_{ijk\ell} U_{k,\ell} \quad (36)$$

で与えられる。転位応力は領域Dの境界 $|D|$ では消失し、負荷応力は境界 $|D|$ において境界条件を満足すべきであるから

$$\sigma_{ij} n_j = 0 \quad (37)$$

$$\tau_{ij} n_j = F_i \quad (38)$$

ただし $F_i(x, t)$ は外力である。変形は面 $S(t)$ において不連続量 b_i (Burgersベクトル) をもつ。また面 $S(t)$ は転位ループ $L(t)$ に囲まれているものとする。変位の場合は Green の関数 $G_{ij}(x-x', t-t')$ ⁽⁸¹⁾ によって求められる。この方法は Nabarro ⁽⁸⁰⁾ によって採用され、静止転位に対する Burgers ⁽⁸⁰⁾ の論文の中にも採用されている。Green の関数 $G_{ij}(x-x', t-t')$ は点 x' 、時間 t' に j 方向に与えられた単位インパルス $\delta(t-t')$ によって生じた点 x 、時間 t における i 方向の変位を表わすものである。Green の関数は運動方程式を満足するから、式 (35) は

$$\begin{aligned} C_{ijk\ell} G_{km,\ell}(x-x', t-t') + \delta_{im} \delta(x-x', t-t') \\ = \rho \ddot{G}_{im}(x-x', t-t') \end{aligned} \quad (39)$$

となる。ただし δ_{im} はクロネッカの δ であり $\delta(x-x', t-t') = \delta(x-x') \delta(t-t')$ は 2 個の Dirac の δ 関数の積で、任意の連続関数 $f(x, t)$ に対して

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_D \delta(x-x', t-t') f(x', t') dD' dt' = f(x, t) \quad (40)$$

を満足する。こゝで体積積分は点 x' に関して行なうものとする。境界を自由表面とすると境界 $|D|$ において式 (37) は

$$C_{ijk\ell} G_{km,\ell} (x-x', t-t') n_j = 0 \quad (41)$$

となる。材料が等方性で無限に延びているものとする、Green の関数 G_{ij} は次式で与えられる。⁽⁸⁷⁾

$$4\pi\rho G_{ij} (x-x', t-t') = \left(\frac{1}{r}\right)^3 \overline{x_i} \overline{x_j} \left\{ \frac{\delta(\overline{t}-\overline{r}/a)}{a^2} - \frac{\delta(\overline{t}-\overline{r}/c)}{c^2} \right\} \\ + \delta_{ij} \cdot \frac{\delta(\overline{t}-\overline{r}/c)}{\overline{r} c^2} + \left(\frac{1}{\overline{r}}\right)_{,ij} \int_{\overline{r}/a}^{\overline{r}/c} \tau \delta(\overline{t}-\tau) d\tau \quad (42)$$

ただし $a^2 = \frac{(\lambda+2\mu)}{\rho}$, λ, μ は Lamé の定数

$$c^2 = \frac{\mu}{\rho}$$

$$\overline{x_i} = x_i - x_i'$$

$$\overline{r} = (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2)^{1/2}$$

$$\overline{t} = t - t'$$

δ = Dirac の δ 関数

より面 $S(t)$ 上に変形の不連続点をもつ式 (35) ~ (38) の解を得るために次の等式 (43) を考えよう。

$$C_{ijk\ell} U_{k,\ell} (x', t') G_{im,j} (x-x', t-t') \\ = C_{ijk\ell} G_{km,\ell} (x-x', t-t') U_{i,j} (x', t') \quad (43)$$

この等式 (43) は弾性係数 $C_{ijk\ell}$ の対称性より導びかれる。Gauss の法則を用いて式 (43) を点 x' に関して積分すると

$$- \int_{S(t')} C_{ijk\ell} U_{k,\ell} G_{im} ds_j' + \int_D C_{ijk\ell} U_{k,\ell,j} G_{im} dD'$$

$$= \int_{S(t')} C_{ijk} \ell G_{km, \ell} U_i dS'_j + \int_D C_{ijk} \ell G_{km, \ell} U_i dD' \quad (44)$$

となる。ただし dS_j は面積 dS の j 成分であり、かつ $G_{im, j} = -\partial G_{im} / \partial x_j$ である。式 (44) の両辺の第一項は $|D|$, $S(t')$ および $S(t')$ の負の面における面積分を含む。 $S(t')$ 上においては $U_i(x', t')$ は不連続量 b_i をもつ故、式 (44) の右辺の第一積分は

$$\int_{S(t')} C_{ijk} \ell G_{km, \ell} b_i dS_j$$

となる。ただし $|D|$ 上の積分は式 (41) の条件により消える。また式 (44) の左辺の第1積分は式 (37) および (38) の条件および $S(t')$ 上の直応力の連続性によって $|D|$ 上の積分だけになる。したがって式 (44) は次のようになる。

$$\begin{aligned} & - \int_{|D|} F_i(x', t') G_{im}(x-x', t-t') dS' + \int_D \rho \ddot{U}_i(x', t') G_{im}(x-x', t-t') dD' \\ & = \int_{S(t')} C_{ijk} \ell G_{km, \ell}(x-x', t-t') b_i dS'_j + \int_D \rho \ddot{G}_{im}(x-x', t-t') U_i(x', t') dD' \\ & \quad - \int_D \delta_{im} \delta(x-x', t-t') U_i(x', t') dD' \end{aligned} \quad (45)$$

式 (45) を t' に関して $-\infty$ より $+\infty$ まで積分すれば式 (40) より式 (44) の最後の積分は $-\delta_{im} U_i(x, t)$ になる。式 (45) の両辺の第2項の時間積分は互いに等しくなる。何故ならば G_{im} および \dot{G}_{im} は $t' = \pm\infty$ において零となるので部分積分法により

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} \int_D \rho \dot{U}_i G_{im} dD' dt' &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_D \rho \dot{U}_i \dot{G}_{im} dD' dt' \\ \int_{-\infty}^{\infty} \int_D \rho U_i \ddot{G}_{im} dD' dt' &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_D \rho \dot{U}_i \dot{G}_{im} dD' dt' \end{aligned} \quad (46)$$

したがって式 (44) は次のごとくなる。

$$U_m(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{S(t')} C_{ijk} \ell G_{km, \ell}(x-x', t-t') b_i dS_j' dt' \\ + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{|D|} F_i(x', t') G_{im}(x-x', t-t') dS' dt' \quad (47)$$

もし $S(t)$ が t に無関係ならば、転位による変形に関する限り静的問題になる。静的な解は時間の項のない静的 Green 関数と呼ばれる単位集中力による変位 $G_{km}(x-x')$ を用いることによって得られる。すなわち上式において

$$\int_{-\infty}^{\infty} G_{km}(x-x', t-t') dt' \equiv G_{km}(x-x') \quad (48)$$

とおけばよい。

ひずみは次のように座標 n に關して U_m を微分することによって得られる。

$$U_{m, n}(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{S(t')} C_{ijk} \ell G_{km, \ell n}(x-x', t-t') b_i dS_j' dt' \\ + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{|D|} F_i(x', t') G_{im, n}(x-x', t-t') dS' dt' \quad (49)$$

こゝで用いるひずみ $U_{m, n}$ は非対称ひずみであり、通常用いているひずみは

$$\frac{1}{2} (U_{m, n} + U_{n, m})$$

から求められる。式 (49) より、ひずみには転位応力および負荷応力の両者が寄与していることがわかる。したがって転位応力および負荷応力は式 (49) の各項に弾性係数を乗じてそれぞれ次のごとく表わされる。

$$\sigma_{pq} = C_{pqmn} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{S(t')} C_{ijkl} \ell_{km} \ell_n (x-x', t-t') b_i dS_j' dt' \quad (50)$$

$$\tau_{pq} = C_{pqmn} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{|D|} F_i (x', t') G_{im,n} (x-x', t-t') dS' dt'$$

式 (47) および (49) の第1項をそれぞれ転位変位および転位ひずみと呼ぶことにする。何故ならばそれらは弾性学的には負荷外力に独立した項であるからである。また両式の第2項をそれぞれ負荷弾性変位および負荷弾性ひずみと呼ぼう。転位ひずみおよび負荷弾性ひずみは弾性的で Hook の法則によって応力と関係づけられている。負荷荷重 (外力 $F_i (x, t)$) を取り除くと負荷弾性ひずみは零になるが、転位ひずみは回り面が除荷の際変化しない限り零とはならない。

次に式 (47), (49) および (50) で表わされた転位変位, 転位ひずみおよび転位応力を転位ループに沿う線積分で表わしてみよう。転位ひずみの線積分は Green の法則を用いて (49) の第1項より次のように表わされる。

$$U_{m,n} (x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{L(t')} C_{ijkl} \varepsilon_{n,jh} G_{km,\ell} (x-x', t-t') b_i d\ell_h' dt' \\ + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{L(t')} \rho \dot{G}_{im} (x-x', t-t') b_i \varepsilon_{n\ell h} v_\ell (x', t') d\ell_h' dt' \quad (51)$$

ただし $d\ell_h'$ は転位の線素 (line element) の ℓ 成分であり, v_ℓ は転位の速度の ℓ 成分である。また $\varepsilon_{n,jh}$ は n, j, h の順序が 1, 2, 3 の偶順列か奇順列かに従って +1 または -1 の値になる permutation である。式 (51) と (49) の第1項とが等しいことは

$$\int_{\Delta S} dS_n' = \oint_L \varepsilon_{n\ell h} v_\ell d\ell_h' \Delta t' \quad (52)$$

の等式を用いて導かれる。式 (52) において ΔS は時間増分 $\Delta t'$ に相応する $S(t')$ の増分である。転位応力 σ_{pq} に対する線積分は式 (51) に弾性係数 C_{pqmn} を乗じて求めることができる。

8・3 応力分布の計算

次に、薄箔において箔の表面に垂直に Burgers ベクトルをもつらせん転位の周辺の応力分布を求めよう。式 (51) で与えられたひずみは速度 $V\ell$ で動いている一般的な解であるが、転位が静止している場合には $V\ell = 0$ 、かつ式 (47) の関係を用いれば、転位ひずみは

$$U_{m,n}(x) = \int_L \varepsilon_{njh} C_{ijk\ell} G_{km}^* \ell(x-x') b_i d\ell' h \quad (53)$$

は

で与えられる。一方点 $x'(x', y', z')$ に力 (X_0, Y_0, Z_0) が作用したときの点 $x(x, y, z)$ における変位は

$$(u, v, w) = \frac{\lambda + 3\mu}{8\pi\mu(\lambda + 2\mu)} \left(\frac{X_0}{r}, \frac{Y_0}{r}, \frac{Z_0}{r} \right) + \frac{\lambda + \mu}{8\pi\mu(\lambda + 2\mu)} \left(\frac{\bar{x}}{r}, \frac{\bar{y}}{r}, \frac{\bar{z}}{r} \right) \frac{X_0\bar{x} + Y_0\bar{y} + Z_0\bar{z}}{r^2} \quad (54)$$

は

または添字記号法を用いて

$$U_m = \frac{a^2 + c^2}{8\pi\mu a^2} \cdot \frac{X_{0m}}{r} + \frac{a^2 - c^2}{8\pi\mu a^2} \cdot \frac{\bar{x}_m}{r} \frac{X_{0i} \bar{x}_i}{r^2} \quad (55)$$

で与えられる。式 (42) における G_{ij} は時間の関数であったが、今考えているのは静止した転位であるため式 (53) に用いられる Green の関数 G_{km}^* は位置 x のみの関数で与えられる。すなわち G_{km}^* は式 (54) あるいは (55) の U_m より、

$$G_{km}^*(x-x') = \frac{a^2 + c^2}{8\pi\mu a^2} \frac{\delta_{km}}{r} + \frac{a^2 - c^2}{8\pi\mu a^2} \frac{\bar{x}_k \bar{x}_m}{r^3} \quad (56)$$

となる。この式は m -方向に単位力が加わったときの k 方向の変位を示すものである。さて弾性係数 $C_{ijk\ell}$ は Lamé の定数 λ および μ を用いれば次式で表わされる。

$$C_{ijk\ell} = \mu \delta_{ik} \delta_{j\ell} + \mu \delta_{il} \delta_{jk} + \lambda \delta_{ij} \delta_{k\ell} \quad (57)$$

次に、薄箔の厚さを h とし、座標軸を第173図に示したようにとるものとする。かつらせん転位のBurgersベクトルの方向を z 軸の正の方向にとれば

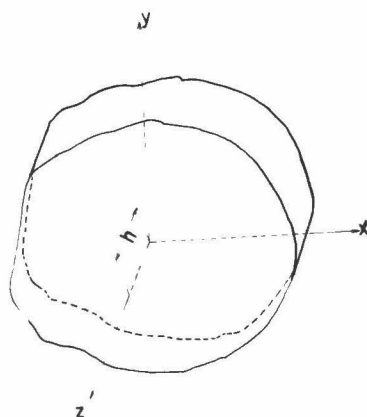
$$\begin{aligned}d\ell'_h &= dz', & h &= 3 \\b_i &= b_3, & i &= 3 \\r^2 &= x^2 + y^2 + (z - z')^2 \\ \bar{x} &= x, \quad \bar{y} = y, \quad \bar{z} = z - z'\end{aligned}$$

したがって式(53)の微分形は

$$\begin{aligned}dU_{m,n} &= \varepsilon_{njh} C_{ijk\ell} G_{km,\ell}^* (x-x') b_i d\ell'_h \\ &= \varepsilon_{nj3} C_{3jk\ell} G_{km,\ell}^* (x-x') b_3 dz' \\ &= (\varepsilon_{n13} C_{31k\ell} + \varepsilon_{n23} C_{32k\ell}) G_{km,\ell}^* b_3 dz'\end{aligned}$$

式(57)を用いれば $dU_{n,m}$ の各成分は

$$\begin{aligned}dU_{m,1} &= \mu (G_{3m,2}^* + G_{2m,3}^*) b_3 dz' \\ dU_{m,2} &= -\mu (G_{3m,1}^* + G_{1m,3}^*) b_3 dz' \\ dU_{m,3} &= 0\end{aligned}\tag{58}$$



第173図 座標軸

となる。次に

$$\int_{-\infty}^{\infty} G_{km, 3}^* b_3 dz' = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{db_3}{dz'} G_{km}^* dz'$$

を用いると、式 (58) はさらに次のようになる。

$$dU_{1, 1} = \mu (G_{31, 2}^* b_3 + G_{21}^* \frac{db_3}{dz'}) dz'$$

$$dU_{2, 1} = \mu (G_{32, 2}^* b_3 + G_{22}^* \frac{db_3}{dz'}) dz'$$

$$dU_{3, 1} = \mu (G_{33, 2}^* b_3 + G_{23}^* \frac{db_3}{dz'}) dz'$$

$$dU_{1, 2} = -\mu (G_{31, 1}^* b_3 + G_{31}^* \frac{db_3}{dz'}) dz' \quad (59)$$

$$dU_{2, 2} = -\mu (G_{32, 1}^* b_3 + G_{12}^* \frac{db_3}{dz'}) dz'$$

$$dU_{3, 2} = -\mu (G_{33, 1}^* b_3 + G_{13}^* \frac{db_3}{dz'}) dz'$$

$$dU_{1, 3} = dU_{2, 3} = dU_{3, 3} = 0$$

$$\text{今} \quad D_1 \equiv \frac{\lambda + 3\mu}{8\pi\mu(\lambda + 2\mu)} = \frac{a^2 + c^2}{8\pi\mu a^2}.$$

(60)

$$D_2 \equiv \frac{\lambda + \mu}{8\pi\mu(\lambda + 2\mu)} = \frac{a^2 - c^2}{8\pi\mu a^2},$$

$$r^2 \equiv x^2 + y^2,$$

$$\eta = \frac{z - z'}{r},$$

とおくことにする。したがって式 (56) は

$$G_{km}^* = D_1 \frac{\delta_{km}}{r} + D_2 \frac{\bar{x}_k \bar{x}_m}{r^3} \quad (61)$$

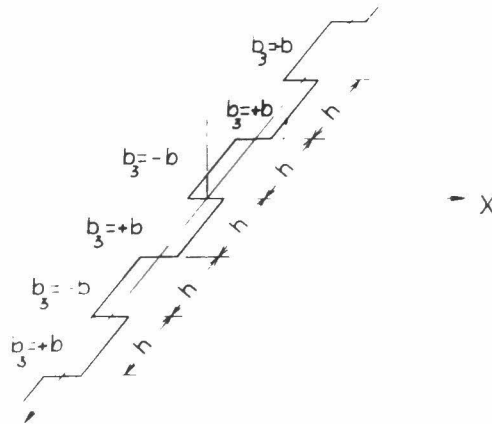
となる。

以上導いた式は材料が等方性の無限物体に対するものである。箔の厚みが h であるので、第174図に示したごとく無限物体を仮定し、鏡像の原理を用いて薄箔中の応力の場を計算する。らせん転位が同図に示したように間隔 h で正負につながっているものとする。すなわち

$$b_3 = b_3(z') = (-1)^n b \quad (62)$$

ただし $n = [z'/h]$

で転位の大きさが表わされる。式 (61) および (62) を式 (59) に代入して、 z' に関して $-\infty$ から $+\infty$ の全域にわたって積分すれば



第174図 転位配置図

$$U_{1,1} = 4b\mu D_2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-1)^n \frac{1}{h^3 \left\{ \left(\frac{r}{h}\right)^2 + \left(\frac{z}{h} - n\right)^2 \right\}^{3/2}}$$

$$= 2b\mu D_2 \frac{\sin 2\theta}{r} \left(\frac{r}{h}\right)^3 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{(-1)^n}{\left\{ \left(\frac{r}{h}\right)^2 + \left(\frac{z}{h} - n\right)^2 \right\}^{3/2}}$$

$$U_{2,2} = -U_{1,1}$$

$$U_{1,2} + U_{2,1} = -4b\mu D_2 \frac{\cos 2\theta}{r} \left(\frac{r}{h}\right)^3 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{(-1)^n}{\left\{ \left(\frac{r}{h}\right)^2 + \left(\frac{z}{h} - n\right)^2 \right\}^{3/2}}$$

$$U_{3,1} = b\mu (D_1 + D_2) \frac{\sin \theta}{r} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-1)^n \left[\frac{\frac{z}{h} - (n+1)}{\left\{ \left(\frac{r}{h}\right)^2 + \left(\frac{z}{h} - n - 1\right)^2 \right\}^{1/2}} - \frac{\frac{z}{h} - n}{\left\{ \left(\frac{r}{h}\right)^2 + \left(\frac{z}{h} - n\right)^2 \right\}^{1/2}} \right]$$

$$- 2b\mu D_2 \frac{r}{h} \sin \theta \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-1)^n \left[\frac{\frac{z}{h} - (n+1)}{\left\{ \left(\frac{r}{h}\right)^2 + \left(\frac{r}{h} - n - 1\right)^2 \right\}^{3/2}} - \frac{\frac{z}{h} - n}{\left\{ \left(\frac{r}{h}\right)^2 + \left(\frac{r}{h} - n\right)^2 \right\}^{3/2}} \right]$$

$$U_{3,2} = -\frac{\cos \theta}{\sin \theta} U_{3,1}$$

が得られる。

次に転位応力 σ_{pq} は弾性係数 C_{pqmn} を式(53)に乗じて直交座標軸に関する応力成分を求めることができる。次に応力分布は z 軸に関して対称なので円筒座標 (r, θ, z) における応力成分を計算すると

$$\sigma_{rr} = \sigma_{xx} \cos^2 \theta + \sigma_{yy} \sin^2 \theta + 2\tau_{xy} \cos \theta \sin \theta = 0$$

$$\sigma_{\theta\theta} = 0$$

$$\sigma_{zz} = 0$$

$$\tau_{rz} = 0$$

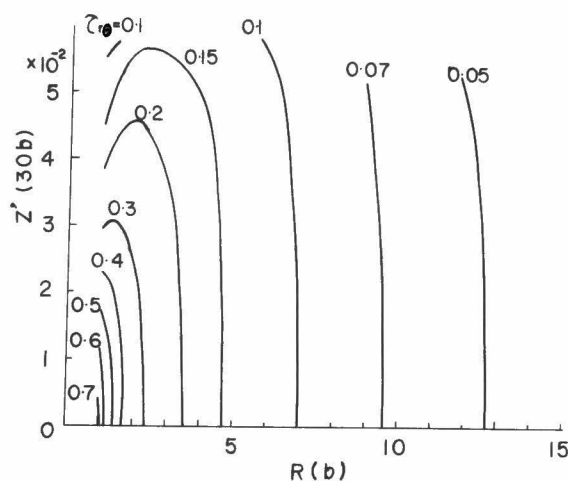
$$\tau_{r\theta} = -4b\mu^2 D_2 \frac{1}{r} \left(\frac{r}{h}\right)^3 \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-1)^n \frac{1}{\left\{ \left(\frac{r}{h}\right)^2 + \left(\frac{z}{h} - n\right)^2 \right\}^{3/2}} \quad (63)$$

$$\tau_{\theta z} = b\mu^2 (D_1 + D_2) \frac{1}{r} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-1)^n \left[\frac{\frac{z}{h} - (n+1)}{\left\{ \left(\frac{r}{h}\right)^2 + \left(\frac{z}{h} - n + 1\right)^2 \right\}^{1/2}} - \frac{\frac{z}{h} - n}{\left\{ \left(\frac{r}{h}\right)^2 + \left(\frac{z}{h} - n\right)^2 \right\}^{1/2}} \right]$$

$$- 2b\mu^2 D_2 \frac{r}{h^2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-1)^n \left[\frac{\frac{z}{h} - (n+1)}{\left\{ \left(\frac{r}{h}\right)^2 + \left(\frac{z}{h} - n + 1\right)^2 \right\}^{3/2}} - \frac{\frac{z}{h} - n}{\left\{ \left(\frac{r}{h}\right)^2 + \left(\frac{z}{h} - n\right)^2 \right\}^{3/2}} \right] \quad (64)$$

式 (63) および (64) で示されるせん断応力 $\tau_{r\theta}$ および $\tau_{\theta z}$ のみが残し、他の応力成分はすべて零となる。かつ $z=0$ および h において $\tau_{\theta z}=0$ となることが示され、 $\tau_{r\theta}$ は $z=h/2$ において 0、かつ $z=h/2$ の両側の符号が正負逆になることも示される。

前にも仮定したように等方性の物体であるから (60) 式の D_1 、 D_2 を式 (63)、(64) に代入し、Lame の定数の λ を μ および Poisson 定数 σ を用いて応力 $\tau_{r\theta}$ 、 $\tau_{\theta z}$ を表わすと、これら二応力は b 、 μ および σ の関数になる。今 $\sigma=0.3$ とおいて電子計算機を用いて応力分布を



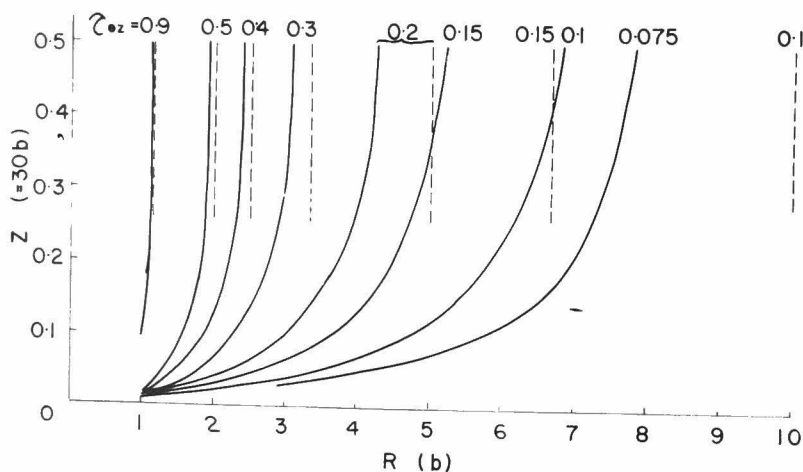
第175図 $\tau_{r\theta}$ 等応力線図

計算した一例を第175図および第176図に示した。両図とも箔の厚さを $30b$ (b はBurgersベクトル)の場合で第175図は $\tau_{r\theta}$ 、第176図は $\tau_{\theta z}$ について等応力線図として示したものである。両図において横軸は r 方向で単位はBurgersベクトル b 、縦軸は z 方向で単位は箔の厚さ h を1としている。また応力の単位は $b\mu/2\pi$ である。

さて無限物体中に単一のらせん転位が存在するときの応力分布は

$$\tau_{\theta z} = -\frac{b\mu}{2\pi} \frac{1}{r} \quad (65)$$

で与えられ、他の応力成分はすべて0になる。この値を第176図の点線にして示した。 $\tau_{r\theta}$ が生じてくるのは材料が薄い箔であるためで、第175図より明らかな如くこの応力は表面に局在し、内部では応力は消失してしまう。次に $\tau_{\theta z}$ は前に述べた如く表面では0となり材料の中央部では式(65)で示した値に近づく。しかし箔の厚さが $30b$ では式(65)で示される値よりはるかに



第176図 $\tau_{\theta z}$ 等応力線図 (点線は無限物体の場合の等応力線図)

小さいが、 $H=1000b$ になると、箔の中央部では式 (65) の値とほとんど同じになる。

8・4 結 言

本章においては薄い箔中に、箔に直角に存在するらせん転位によって生ずる応力分布の計算を Mura によって提案された基礎式を用いて行なった。その結果、無限物体においては応力成分 $\tau_{\theta z}$ 以外はすべて消滅するが箔においては $\tau_{\theta z}$ の他に $\tau_{r\theta}$ の応力成分が生ずる。応力成分 $\tau_{r\theta}$ は箔の表面において最大となり、箔の中心では 0 となる。すなわち $\tau_{r\theta}$ は箔の表面に局在する応力成分である。次に応力成分 $\tau_{\theta z}$ は箔の表面においては 0 となり、表面から内部に進むに伴い、無限物体の中に存在する $\tau_{\theta z}$ の値に近づくが、箔の厚さが薄い場合には無限物体の場合の $\tau_{\theta z}$ よりもはるかに小である。

以上の計算結果より明らかな如く、我々が転位を観測する場合、材料の表面に存在する転位応力は無限物体の場合の応力成分 $\tau_{\theta z}$ とは異なった $\tau_{r\theta}$ であることに注意する必要がある。また透過 X 線法等により応力を実測したり、あるいは転位同士の相互干渉を観測しようとする場合、試験片はかなり薄くなければならない。試験片が非常に薄くなると転位線から離れるに従い応力は急速に減少するという事も考慮に入れておかねばならない。

結 論

本論文においては、実働荷重による疲れの挙動について基礎的な実験的研究の結果およびそれらについての考察を述べた。

まず第1章において、定応力および定ひずみ疲れ試験を行ない、疲れの進行に伴うひずみ振幅および応力振幅の変化の挙動を明らかにした。疲れの進行に伴って材料は単に軟化あるいは硬化と一方的に進行するものではなく、疲れの進行に伴って軟化・硬化・平衡の順にひずみあるいは応力振幅は変化する。

第2章においては、静的バウレンガ効果と同様の変形抵抗挙動が重複片振りねじり繰返し応力の場合にも現われるかどうかを黄銅について研究した。その結果、比較するために行なった静繰返し試験、重複クリープ試験におけるひずみの進行とは異った挙動を示している。すなわち静繰返し、重複クリープ試験では応力区間の増加とともに塑性ひずみは減少するが、重複繰返し試験では、第2応力区間で静バウレンガ効果と同様の変形抵抗挙動を示し、以後応力区間の増加とともに塑性ひずみは減少し、第5応力区間以後は逆に増加する傾向を示している。この傾向は炭素鋼の結果とは異ったものである。

第3章においては、二段二重重複繰返し応力を試験片に与えた場合、試験片が疲れの進行に伴って示す種々の性質の変化を研究した。すなわち二段二重重複繰返し応力を試験片に与えたとき、疲れの進行に伴って、試験片の弾性限度・残留ひずみ・ヒステリシスループの面積・塑性ひずみ振幅等の変化、および疲れき裂の進行等を研究し、一次応力の繰返しが如何なる影響を試験片に及ぼしているかについて考察した。一次応力の繰返しを受けた試験片の二次応力でのこれらの性質は処女材の性質とはまったく異ったものである。実働荷重での疲れ強さを考える場合、一定応力振幅の疲れ試験の結果は比較の対象として扱われるべきものである。塑性ひずみ振幅の変化では、二次応力繰返し中の塑性ひずみ振幅の変化は一定応力振幅繰返し中の塑性ひずみ振幅の変化とは異った挙動を示すが、その平均的な値は、疲れ寿命の増減と比例している。

第4章においては応力波形が疲れ強さに及ぼす影響に関して研究した。この研究を遂行するために複調和繰返し疲れ試験機を新しく試作し、応力波形と疲れ強さの関係について研究した。ピーク

波と正弦波では両振り、片振り応力の場合にも疲れ強さの間に差は見い出されなかったが、双子波と正弦波の間には明らかに疲れ強さの差が現われた。双子波、複調和応力波においても最大応力の大きさ、および二波の大きさによって疲れ寿命が非常に大きくなる場合が現われ、二段二重重複繰返し応力の際のコーキング効果、過小応力効果と同様の傾向を示した。

第5章においてはプログラム試験の一種として切欠き材の二段多重重複回転曲げ疲れ試験、および平滑材の三段多重重複回転曲げ疲れ試験を行ない、荷重条件と疲れ強さとの関係について研究を行なった。またこれらの研究を行なうために三段多重重複荷重負荷装置および多段多重重複荷重疲れ試験機を試作した。また多段多重重複荷重負荷中の試験片のたわみ振幅の変化をも併せ測定したが、これらたわみの変化の挙動は第3章に述べた二段二重重複荷重下の塑性ひずみ振幅変化の挙動とほぼ同じ傾向を示した。切欠き材の二段多重重複荷重下の疲れ挙動は平滑材のそれと同様の傾向を示した。

第6章においては、実働荷重下の疲れ試験を行なうに当り、実働荷重条件と疲れ強さの挙動との法則性を明らかにするための基礎的なプログラム試験の方法について考察した。

第7章においては円形断面と長方形断面のねじり疲れ試験を実施し、疲れき裂の発生および、疲れ寿命が断面形状によって如何に変化するかについて研究した。疲れ強さは、静的な降伏点の大きさの順序と同じ順序であった。また試験片に疲れき裂が表われる繰返し数は3種類の長方形断面の試験片ではほぼ同じで、これは円形断面のそれのほぼ10倍となっている。またこれは、断面内で弾性的に最大応力の0.9倍以上の応力をもつ面積の比に反比例しており、長方形断面での疲れ寿命は疲れき裂の伝播速度によって差が生ずるものであろう。

第8章においては、等方性の結晶の薄い箔中に箔の表面に垂直ならせん転位が存在するとき、この転位周辺の応力の場を計算した。無限物体においては応力 $\tau_{\theta z}$ （パーカースベクトルの方向を z 軸方向とする）のみが存在し、他の応力成分はすべて零であるが、薄い箔の場合には $\tau_{\theta z}$ の他に $\tau_{r\theta}$ の応力成分が存在する。 $\tau_{r\theta}$ は箔の表面において最大の値をとり、中心では急速に零に収束する。一方 $\tau_{\theta z}$ は表面においては零、中心に向うにつれて無限物体中の応力 $\tau_{\theta z}$ の値に近づくことを示した。

以上本文で得られた結果を簡単に述べたが、二段二重重複荷重のように簡単なプログラム試験においても試験片が示す疲れ挙動は一定応力振幅の場合とはまったく異なったものになっている。

G・R・Gohn が彼の疲れの機構に関する総説⁽¹⁾において述べているように、今日まで種々提案されてきた疲れの機構に関する理論は、理論のある段階までは観測された現象に基いているが、その理論式を完全なものとするために、実験的証明が適用されないようなある仮定を導入している。したがってそのような理論が正しいということを我々は実証もできないし、また間違っていると反証することも難しい。

上述のことより一定応力振幅の疲れ試験結果から実働荷重による疲れ挙動を導びくということは非常に難しいものであると言わねばならない。我々はさらに数多くの種々の条件下における疲れ挙動を明らかにし、疲れの法則性を見い出すべきであろう。

最後に当り、本研究を遂行するに当って、終始懇切な御指導を賜りました京都大学河本 実教授に甚深の謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) G.R.Gohn, Materials Research & Standards, Vol. 3, No. 2 (1963), 106頁
- (2) H.J.Gough, The Fatigue of Metals, (Scott, Greenwood & Son, London) (1924)
- (3) 座談会「材料の科学」, 材料, 第13巻, 第125号 (昭39-2) 62頁
- (4) A.H.Cottrell, Dislocations and Plastic Flow in Crystals, (Oxford) (1961)
- (5) J.Bauschinger, Civilingenieur (1881)
Bennett & Weinberg, ASTM Bulletin, No. 220, (Feb. 1957) 20頁
E.Orowan, Proc. Royal Soc. (London) Ser. A, Vol. 171, (1939), 79頁
T.Yokobori, Journ., Physical Soc. of Japan, Vol. 10, No. 5 (1955) 368頁

- I.A.Oding, Reports, Acad. of Sciences, U.S.S.R., Vol.105,
No.6 (1955)
- N.N.Afanasiev, J.Tech.Phys., U.S.S.R., Vol.10 (1940), 1553
頁
- 西原・小林, 機械学会論文集, 12巻 (昭21), 52頁, 65頁
- A.M.Freudenthal, Proc.Roy.Soc., London, Ser.A., Vol.187
(1946), 416頁
- F.E.Fujita, Sci.Rep.RITU, A-6, (1954), 565頁
- E.Orowan, Dislocations in Metals, (1954) (AIME), 69頁
- A.K.Head, Phil.Mag., 44, (1953), 925頁
- (6) 平, 林 材料, 12-123 (昭38), 900頁
- 平・本田, 他, 材料試験, 11-110, (昭37), 699頁, 707頁 機械学会論文集,
27-176, (昭36), 1066頁, 28-194, (昭37), 1335頁
- (7) T.Yokobori, J.Phys.Soc.Japan, Vol.6, (1951), 81頁, Vol.8
(1953), 265頁
- A.M.Freudenthal, ASTM, STP 121, (1952) 3頁
- (8) M.A.Miner, Appl.Mech., J., 12, A-159 (1945)
- (9) J.B.Kommers, Proc.ASTM, 45 (1945) 532頁
- 上田・朝倉, 材料, 13, 125 (昭39-2) 100, 106頁
- 川田, 日本機械学会論文集 30, 209 (昭39-1) 46頁等
- (10) E.M.Prot, Comptes Rendus, Vol.225 (1947), 669頁
- N.Enomoto, ASTM, Proc., Vol.59, (1959), 711頁
- 榎本, 機械学会誌, 62-491 (昭34), 1708頁, 材料試験, 7-54 (昭33), 155
頁
- (11) 桜井・山田・柿内, 材料試験, 7-62 (昭33), 618頁, 8-66 (昭34), 261頁,
平・村上, 材料試験, 7-62 (昭33), 591頁, 8-70 (昭34), 607頁, 9-78 (昭
35), 210頁

- (12) 西畑・山浦, 材料試験, 10-88 (昭36), 45頁
- (13) J.A.Ewing & J.C.W. Humfrey, Phil.Trans., No200 (1902),
A.241頁
H.J.Gough, Proc.ASTM, Vol.33 (1933), 3頁
- (14) 鵜戸口・川田・倉西, 材料科学 下巻 (機械学会) (昭34), 543頁
財満 材料試験, 6-40, (昭32), 20頁
- (15) 河本・田中, 他2名, 材料試験, 8巻, 74号 (昭34), 837頁
- (16) D.G.Younger, Jr., Proc.ASTM, 58 (1958), 576頁
- (17) J.Morrow & G.M.Sinclair, ASTM STP No 237
- (18) 竹中, 機械学会論文集, 26巻, 161号 (昭35-1), 102頁
- (19) 菊川・沼田, 日本機械学会第36期通常総会講演会前刷集No.2, (昭34-4), 11頁
- (20) 平・村上・小寺沢, 材料試験, 9巻, 85号 (昭35), 606頁
- (21) 木谷, 機械学会論文集, 5巻, 18号 (昭14-2), 36頁
- (22) D.S.Dugdale J.Mech.Phys.of Solids, 7巻, 2号 (1959), 135頁
- (23) 市原・菅原, 機械学会誌, 39巻, 232号 (昭11), 445頁と類似構造のもの。
- (24) 河本・近藤・浜田, 機械学会論文集, 17巻, 61号 (昭26), 143頁
- (25) 材料試験協会疲労部門委員会研究報告, 材料試験, 8巻, 72号 (昭34), 684頁
河本・中川・小浜, 機械学会論文集, 26巻, 161号 (昭35-1), 108頁
- (26) 日本材料学会疲労部門委員会研究報告, 材料, 13巻, 131号 (昭39-8), 554頁
- (27) 横堀・浜本・大塚, 機械学会第35期通常総会講演会前刷, 講演番号131, (昭33-4)
- (28) 西原・河本, 機械学会論文集, 5巻, 20号 (昭14-8), 1-19
- (29) J.Bauschinger, Ziviling, 27, (1881), 289頁
F.Seitz, J.Appl.Phys., Vol.12, (1941, July), 538頁
- (30) 河本・高木・岸本, 機械学会論文集, 26-170 (昭35-10), 1333頁
- (31) G.M.Sinclair, Proc.ASTM, 52, (1952), 744頁
- (32) 河本, 材料試験, 7-63 (昭33-12), 669頁
- (33) J.Kommers, Proc.ASTM, 45 (1945), 532頁

- (34) 日本材料試験協会疲労部門委員会共同研究, 材料試験, 8-72 (昭34-9) 683頁
- (35) 河本・田中, 機械学会論文集, 26-167 (昭35-7), 963頁
- (36) 河本・田中, 材料試験, 10-88 (昭36-1), 28頁
- (37) 河本・田中・中村・中井, 材料試験第10期総会講演会前刷, 前刷番号I-25 (昭36-5), 89頁
- (38) 菊川・沼田, 機械学会第36期通常総会講演会前刷集, No. 2, (昭34-4), 11頁
- (39) L.F.Coffin, Trans. ASME, 76-6 (1954-8), 931頁
- (40) L.F.Coffin, ASTM, STP No 165 (1954), 31頁
- (41) E.E.Baldwin, G.L.Sokol, & L.F.Coffin, Proc. ASTM, 57 (1957) 567頁
- (42) L.F.Coffin & J.Tavernelli, G.E. Research Laboratory Report, No 58-RE
- (43) J.Tavernelli & L.E.Coffin, Trans. ASM, 51 (1959), 438頁
- (44) A.Johansson, Colloquium on Fatigue, Proc., Stockholm, (1955), 112頁
- (45) A.C.Low, Intern. Conf on Fatigue of Metals, Session 2, Paper 15 (1956)
- (46) 河本・田中・赤松・堀川, 材料試験, 8-74 (昭34-11), 837頁
- (47) 熊倉, 第5回材料試験連合講演会前刷, 第I部 (昭36-9), 67頁
- (48) Marin, Borachia & Rimrott, Proc. ASTM, 59 (1959), 662頁
- (49) 安藤・西野, 機械学会論文集, 23-131 (昭32-7), 495頁
- (50) 桜井・田山・柿内, 材料試験, 8-66 (昭34), 261頁
- (51) J.C.Grosskreutz & F.R.Rollins, J. Applied Physics, 30-5 (1959), 668頁
K.Thomas & A.Franks, J. Applied Physics, 30-5, (1959), 649頁
- (52) 横堀, 機械学会誌, 58-441, (昭30-10), 712頁

- (53) 中川・入江, 機械学会関西支部第209回講演会前刷, (昭36-11), 15頁
- (54) 日本材料試験協会疲労部門委員会編, 疲労試験便覧, (昭29), 53頁
- (55) 西原・山田, 機械学会論文集, 23-127, (昭32), 136頁
- (56) S.W.Serensen, Intern.Conf.of Fatigue of Metals, (1956),
310頁
- (57) W.L.Starkey & S.M.Marco, Trans.ASME, (1957), 1329頁
- (58) 変動重複荷重をもこれに含めるならば, たとえば
中川・遠藤, 機械学会第38期総会講演前刷, No 37 (昭36-4), 35頁
河本・近藤・浜田, 機械学会論文集, 17-61 (昭26), 143頁
- (59) 日本材料学会編「金属の疲労」丸善 (昭39), 294頁
- (60) J.L.Weisman, Metal Fatigue, (1959), 7頁
- (61) W.G.Johnston & J.J.Gilman, J.Appl.Phys., 30, (1959), 129頁
- (62) J.B.Kommers, Proc.ASTM, 43, (1943), 749頁
- (63) J.A.Bennett, Proc.ASTM, 46, (1946), 693頁
- (64) F.E.Richart, Jr., & N.M.Newmark, Proc.ASTM, 48, (1948),
767頁
- (65) 河本・中川・小浜, 機械学会論文集, 26-161, (1960), 108頁
- (66) A.Droz, E.Gerold & E.Schulz, Arch.Eisen, 21-56 (1950),
181頁
- (67) 川田・関戸・佐々木, 機械学会34期総会講演会前刷1室, (1957), 5頁
- (68) Freudenthal, Proc.ASTM, 53 (1953), 896頁
- (69) Becker, Zeit.VDI, 92-11 (1950), 266頁
- (70) T.J.Dolan & Others, Proc.ASTM, 49 (1949), 646頁
H.T.Corten & T.J.Dolan, Intem.Conf.Fatigue of Metals,
(1956), 235頁
H.W.Liu & H.T.Corten, NASA TN D-256, (1959)
榎本・村山, 材料試験協会第10期総会講演会前刷 (昭36-5)

- (71) 日本材料試験協会，疲労部門委員会，材料試験，8-72，(1959)，726頁
- (72) 河本・中川・村上，材料試験，4-19，(1955)，49頁
 河本・中川・ほか，日本材料試験協会総会講演会，第4期(1955)，第5期(1956)，
 第6期(1957)
 河本・中川，1st Japan Congr. Test. Mat., Proc., (1958)，6頁
- (73) T. J. Dolan, F. E. Richart, & C. E. Work, Proc. ASTM 49 (1949)，
 646頁
 安藤，ほか2名，岐阜大学工学部研究報告，No 6，(昭31)，24頁
- (74) 河本・西岡，材料試験，2-6，(昭28-7)，277頁
- (75) R. Kugel, Proc. ASTM, 61, (1961)，732頁
- (76) 各種の弾性力学，材料力学の教科書にある。たとえば
 小野，材料力学，丸善，(昭17)，357頁
- (77) これらの応力を求める方法も各種の材料力学，弾性力学の本にでているが，たとえば倉西，
 弾性学，日本機械学会，(昭32)，150頁
- (78) G. I. Taylor, Proc. Roy. Soc., A145, (1934)，362頁
- (79) A. H. Cottrell, Dislocations and Plastic Flow in Crystal,
 (Oxford, Clarendon Press) (1956)
- (80) J. M. Burgers, Proc. K. Akad. Wet. (Amst.), 42, (1939)，293頁
- (81) F. R. N. Nabarro, Phil. Mag., 42, (1951)，1224頁
- (82) T. Mura, Phil. Mag., 8-89, (1963)，843頁
- (83) F. C. Frank, Proc. Roy. Soc., A62, (1949)，131頁
- (84) J. D. Eshelby, Proc. Roy. Soc., A197, (1949)，391頁
- (85) A. H. Cottrell, & D. Hull, Proc. Roy. Soc., A242 (1957)，211頁
 A. N. Stroh, Proc. Roy. Soc., A223, (1954)，404頁
 “ “ A232, (1955)，548頁
 N. F. Mott, Acta. Met., 6, (1955)，195頁
 A. J. Kennedy, Phil. Mag., 6, (1961)，49頁

- N.Thompson, Proc.Intern.Conf on the Atom.Mech.of Fracture, (1959)
- A.J.McEvily, Jr., & E.S.McChlin, 同上
- R.L.Fleischer, 同上
- W.A.Wood, Fatigue in Aircraft structure, (Acad.Press, New York), (1956)
- A.J.Kennedy, Intern.Conf.on Fatigue of Metals, (1956), 401頁
- T.Broom, & R.K.Ham, //
- 763頁
- (86) J.J.Gilman, ASM, (1960), 327頁
- W.G.Johnston & J.J.Gilman, J.Appl.Phys., 30-2, (1959), 129頁
- (87) A.E.H.Love, Mathematical Theory of Elasticity, (New York, Dover), (1944)
- (88) 記号については次の参考書をみよ。
- C.E.Pearson, Theoretical Elasticity, (Harvard Univ. Press), (1959) または
- K.Hill, 塑性学 (培風館) (昭32) 附録I. 337頁
- (89) A.M.Freudenthal, Proc.ASTM, 53 (1953) 896頁
- 藕戸口, 材料試験, 6-45, (昭32), 361頁
- (90) 横堀, 材料強度学 (技報堂) (昭31) 1頁
- (91) 日本材料学会編 金属の疲労 (丸善・昭39) 298頁

